

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marko Hećimović**

**Zagreb, 2017.**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

doc. dr. sc. Tea Žakula, dipl. ing.

Student:

Marko Hećimović

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Tei Žakula na mentorstvu, konzultacijama i pomoći tijekom izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom studija.

Marko Hećimović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Hećimović** Mat. br.: 0035181724

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija sunčanog sustava za zagrijavanje potrošne tople vode korištenjem detaljnog energijskog modela**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The Optimization of a Solar Heating System for Domestic Hot Water Using Detailed Energy Model**

### Opis zadatka:

Cilj rada je analiza i optimizacija sunčanog sustava za zagrijavanje potrošne tople vode korištenjem računalnih alata za energijsko modeliranje sustava na primjeru tipične obiteljske kuće. Za modeliranje i optimizaciju energijskih karakteristika sustava te godišnje potrošnje energije potrebno je koristiti tehničke karakteristike proizvođača opreme *Hoval* d.o.o. U radu je potrebno optimizirati veličinu spremnika i sunčanih kolektora te proračunati potrebnu godišnju energiju za grijanje pod pretpostavkom da sustav koristi pomoćni električni grijač. Također je potrebno napraviti usporedbu potrošnje energije dobivene na temelju detaljnih računalnih simulacija i korištenjem proračuna energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava prema normi HRN EN 15316-4-3. Konačno, potrebno je usporediti rezultate proračuna korištenjem stratifikacijskog modela i modela s jednolikom razdiobom temperature za spremnik potrošne tople vode. Sve analize potrebno je provesti na satnoj bazi kroz cijelu godinu za lokacije u Zagrebu i Splitu.

### Rad treba sadržavati:

- tehničku shemu sustava,
- opis korištenih modela,
- rezultate optimizacije parametara sustava i proračuna potrošnje energije korištenjem detaljnog energijskog modela sustava,
- rezultate usporedbe detaljnih računalnih simulacija s proračunom energijskih zahtjeva prema normi HRN EN 15316-4-3,
- rezultate usporedbe stratifikacijskog modela s modelom jednolike razdiobe temperature.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2017.

Datum predaje rada:

30. studenog 2017.


Predviđeni datum obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## Sadržaj

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY .....	X
1. UVOD.....	1
2. Modeliranje sunčanog sustava u računalnom programu TRNSYS .....	3
2.1. Model sunčanog sustava .....	3
2.2. Sunčani kolektor – <i>Type 1</i> .....	4
2.3. Spremnik potrošne tople vode – <i>Type 534</i> .....	7
3. Tehnički opis sustava.....	14
3.1. Potrošnja tople vode.....	14
3.2. Dimenzioniranje sunčanog sustava .....	15
3.3. Regulacija rada sunčanog sustava .....	17
4. Rezultati simulacije rada sunčanog sustava.....	18
4.1. Rezultati simulacija sunčanog sustava sa stratifikacijskim modelom spremnika.....	18
4.2. Rezultati simulacije rada sunčanog sustava sa spremnikom jednolike razdiobe temperature .....	25
4.3. Usporedba rezultata simulacije sunčanog sustava sa spremnikom jednolike temperature i spremnika sa stratifikacijom temperature .....	28
4.4. Optimizacija sunčanog sustava .....	31
5. Proračun energijskih zahtjeva prema normi HRN EN 15316-4-3 .....	38
5.1. Mjesečni proračun sustava sunčevog zračenja.....	38
5.2. Rezultati mjesečnog proračuna prema normi HRN EN 15316-4-3 .....	41
5.3. Usporedba rezultata mjesečnog proračuna te rezultata detaljnih računalnih simulacija sunčanog sustava.....	43

6. Zaključak .....	47
LITERATURA.....	50
PRILOZI.....	51

## POPIS SLIKA

Slika 1. Shema sunčanog sustava .....	2
Slika 2. Shema simulacije sunčanog sustava u računalnom programu TRNSYS.....	3
Slika 3. Model spremnika tople vode [3] .....	7
Slika 4. Dnevna potrošnja PTV-a za tri analizirana režima potrošnje .....	14
Slika 5. Učinkovitost sunčanog kolektora [5] .....	16
Slika 6. Shema stratifikacijskog modela spremnika potrošne tople vode .....	18
Slika 7. Energetska bilanca sunčanog sustava za Zagreb, večernji režim potrošnje PTV-a, korak simulacije 1 sat .....	19
Slika 8. Energetska bilanca sunčanog sustava za Split, večernji režim potrošnje PTV-a, korak simulacije 1 sat .....	20
Slika 9. Temperaturni profil spremnika za dan 1. kolovoz, jutarnji režim potrošnje PTV-a, grad Zagreb, korak simulacije 1 sat.....	21
Slika 10. Temperaturni profil spremnika za dan 1. kolovoz, jutarnji režim potrošnje PTV-a, grad Zagreb, korak simulacije 1 minuta .....	22
Slika 11. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava između satne i minutne simulacije, grad Zagreb.....	23
Slika 12. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava između satne i minutne simulacije, grad Split .....	24
Slika 13. Određivanje postavne temperature električnog grijača spremnika jednolike razdiobe temperature .....	25
Slika 14. Energetska bilanca sunčanog sustava za Zagreb, večernji režim potrošnje PTV-a, spremnik s jednolikom razdiobom temperature .....	26
Slika 15. Energetska bilanca sunčanog sustava za Split, večernji režim potrošnje PTV-a, spremnik s jednolikom razdiobom temperature .....	27
Slika 16. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava, stratifikacijski model spremnika i model spremnika s jednolikom razdiobom temperature za grad Zagreb .....	28
Slika 17. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava, stratifikacijski model spremnika i model spremnika s jednolikom razdiobom temperature za grad Split .....	29
Slika 18. Profil temperatura u spremniku tople vode tijekom dana, stratifikacijski spremnik i spremnik s jednolikom razdiobom temperature .....	30

Slika 19. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava s dvije različite zapremnine spremnika PTV-a, grad Zagreb .....	31
Slika 20. Usporedba potrebne energije dodatnog grijača sunčanog sustava s dvije različite zapremnine spremnika PTV-a, grad Zagreb.....	32
Slika 21. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava s dvije različite zapremnine spremnika PTV-a, grad Split .....	33
Slika 22. Usporedba potrebne energije dodatnog grijača sunčanog sustava s dvije zapremnine spremnika PTV-a, grad Split .....	34
Slika 23. Srednja temperatura spremnika za dvije različite zapremnine.....	35
Slika 24. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava za različite režime potrošnje tople vode, grad Zagreb, spremnik tople vode 320 l.....	36
Slika 25. Energetska bilanca sunčanog sustava za grad Zagreb prema normi HRN EN 15316-4-3.....	41
Slika 26. Energetska bilanca sunčanog sustava za grad Split prema normi HRN EN 15316-4-3 .....	42
Slika 27. Mjesečni dobici energije sunčanog sustava, grad Zagreb .....	43
Slika 28. Mjesečni dobici energije sunčanog sustava, grad Split.....	44
Slika 29. Potrebna energija dodatnog grijača, usporedba rezultata prema HRN EN 15316-4-3 i računalnih simulacija u TRNSYS-u, grad Zagreb.....	45
Slika 30. Potrebna energija dodatnog grijača, usporedba rezultata prema HRN EN 15316-4-3 i računalnih simulacija u TRNSYS-u, grad Split .....	46



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Parametri, ulazni i izlazni podaci komponente sunčanog kolektora .....	6
Tablica 2. Tehničke karakteristike spremnika potrošne tople vode .....	15
Tablica 3. Tehničke karakteristike sunčanog kolektora .....	15
Tablica 4. Rezultati simulacija za različite režime potrošnje tople vode te dvije zapremnine spremnika .....	37

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

DR – MH - 001      Tehnička shema sunčanog sustava

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	[m <sup>2</sup> ]	Površina
a <sub>0</sub>	[-]	Koeficijent učinkovitosti sunčanog kolektora pri razlici srednje temperature radnog medija i zraka = 0 K
a <sub>1</sub>	[W/m <sup>2</sup> K]	Koeficijent toplinskih gubitaka prvog reda
a <sub>2</sub>	[W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ]	Koeficijent toplinskih gubitaka drugog reda
c <sub>p</sub>	[J/kgK]	Specifični toplinski kapacitet
d	[m]	Promjer
F <sub>R</sub>	[-]	Ukupni koeficijent učinkovitosti kolektora
F <sub>av</sub>	[-]	Koeficijent učinkovitosti kolektora u ovisnosti srednjoj temperaturi radnog medija
I	[kJ/h]	Globalno sunčevo zračenje na horizontalnu plohu
I <sub>d</sub>	[kJ/h]	Difuzno zračenje na horizontalnu plohu
I <sub>T</sub>	[kJ/h]	Globalno zračenje na nagnutu plohu
$\dot{m}$	[kg/h]	Protok radnog medija
$\dot{m}_{\text{test}}$	[kg/h]	Protok radnog medija pri testiranju učinkovitosti kolektora
Nu	[-]	Nusseltov broj
Pr	[-]	Prandtlov broj
Q <sub>kol</sub>	[kWh]	Dobici energije sunčanog kolektora
Q <sub>grijač</sub>	[kWh]	Potrebna energija dodatnog grijača
Q <sub>gubici</sub>	[kWh]	Gubici energije spremnika potrošne tople vode
Re	[-]	Reynoldsov broj
T	[°C]	Temperatura
T <sub>a</sub>	[°C]	Temperatura vanjskog zraka
T <sub>av</sub>	[°C]	Srednja temperatura radnog medija
T <sub>i</sub>	[°C]	Temperatura na ulazu u kolektor
T <sub>o</sub>	[°C]	Temperatura na izlazu iz kolektora
U	[W/m <sup>2</sup> K]	Koeficijent prolaza topline
U <sub>L/T</sub>	[W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ]	Koeficijent prolaza topline u ovisnosti o temperaturi

$\alpha$	[-]	Koeficijent apsorpcije kratkovalnog zračenja
$\alpha_u$	[W/m <sup>2</sup> K]	Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane cijevi
$\alpha_v$	[W/m <sup>2</sup> K]	Koeficijent prijelaza topline s vanjske strane cijevi
$\beta$	[°]	Nagib sunčanih kolektora
$\theta$	[°]	Kut upada zračenja
$\eta$	[-]	Koeficijent učinkovitosti sunčanog kolektora
$\lambda$	[W/mK]	Koeficijent vodljivosti topline
$\mu$	[Pa·s]	Dinamička viskoznost
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Gustoća

## SAŽETAK

Zadatak ovog rada bila je analiza i optimizacija sunčanog sustava za zagrijavanje potrošne tople vode korištenjem računalnog alata TRNSYS za detaljno energijsko modeliranje sustava na primjeru tipične obiteljske kuće. Računalne simulacije provedene su na satnoj i minutnoj bazi za tipičnu meteorološku godinu za klimatsko područje grada Zagreba i grada Splita. Rezultati analize pokazali su da sunčani sustav na području Zagreba pokriva 54%, a sustav na području grada Splita 71% potreba za zagrijavanje potrošne tople vode.

Također, ispitan je utjecaj modeliranja spremnika tople vode kao spremnika s jednolikom razdiobom temperature te modeliranje spremnika s temperaturnom stratifikacijom. Utvrđeni su manji dobici energije sunčanog sustava s modelom spremnika s jednolikom razdiobom temperature u iznosu od 8% za sustav na području grada Zagreba te 5% za sustav na području grada Splita.

Uz navedeno, u radu je također analiziran utjecaj režima potrošnje tople vode na energetske bilancu sunčanog sustava te utjecaj povećanja zapremnine spremnika potrošne tople vode. Povećanjem zapremnine spremnika dobici energije sunčanog sustava porasli su za 9%. Analizom utjecaja navika ukućana pri potrošnji tople vode utvrđeno je da navike u potrošnji imaju vidljiv utjecaj na učinkovitost sunčanog sustava.

Konačno, uspoređeni su rezultati detaljnih računalnih simulacija provedenih korištenjem računalnih programa TRNSYS i MATLAB s rezultatima proračuna prema normi HRN EN 15316-4-3. U usporedbi s normom, dobici sunčeve energije prema rezultatima računalnih simulacija veći su za 12,5% za sunčani sustav na području grada Zagreba te 4% za sustav na području grada Splita.

Ključne riječi: energijski model, sunčani sustav za zagrijavanje PTV-a, točnost modela

## SUMMARY

The purpose of this study was to analyze and optimize a solar heating system for domestic hot water by using TRNSYS, a detailed energy modeling tool on the example of a typical family home. Simulations were performed on an hourly and minute basis for a typical meteorological year for the climate area of the city of Zagreb and the city of Split. The results of the analysis showed that the solar system in Zagreb covers 54% and system in Split covers 71% of heating needs for domestic hot water.

Also, the influence of modeling a hot water tank as a fully mixed tank and modeling a tank with temperature stratification was studied. The results showed 8% and 5% lower energy gain of a solar system with a fully mixed tank for the city of Zagreb and city of Split respectively.

Furthermore, the influence of a hot water consumption regime and the effect of a water tank increase on the solar energy balance was analyzed. By increasing the volume of the hot water tank by approximately 50%, solar energy gains increased by 9%. The analysis of the occupants' habits in the usage of the hot water showed that usage habits have notable impact on the efficiency of a solar system.

Finally, the results of detailed computer simulations conducted by using computer programs TRNSYS and MATLAB were compared with calculations according to the norm HRN EN 15316-4-3. Compared to the norm, a solar gains according to computer simulations were 12,5% and 4% higher for the solar systems in the city of Zagreb and the city of Split respectively.

Key words: energy model, solar heating system for domestic hot water, model accuracy

## 1. UVOD

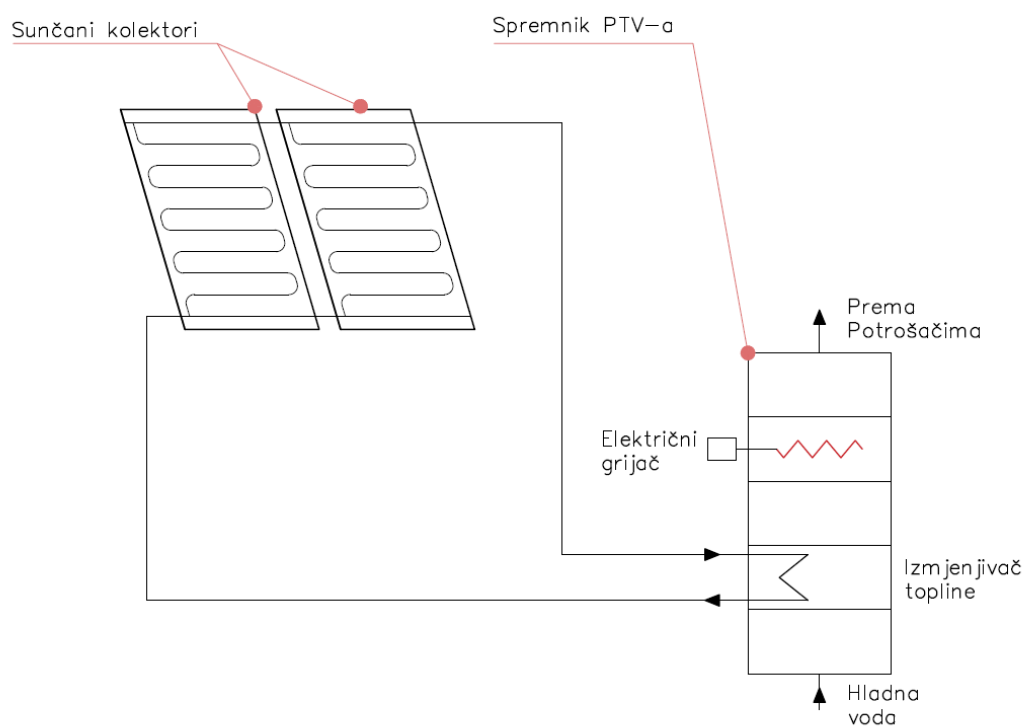
Primjena obnovljivih izvora energije predstavlja jedno od glavnih rješenja za smanjenje emisija stakleničkih plinova te usporavanje klimatskih promjena na Zemlji. Sunce je neiscrpan obnovljivi izvor energije koji oblikuje vrijeme i klimu te održava život na Zemlji mogućim. Pretvaranjem energije dozačene na površinu Zemlje u električnu ili toplinsku energiju moguće je uvelike smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima (ugljen, nafta, plin).

Sustavi za prikupljanje energije Sunca postaju sve dostupniji te postoji zainteresiranost za ugradnju takvih sustava na obiteljske kuće. Optimalnim projektiranjem sunčanih sustava moguće je ostvariti znatne uštede energije, električne ili toplinske.

U ovom radu simuliran je rad sunčanog sustava za zagrijavanje potrošne tople vode na primjeru tipične obiteljske kuće. Spremnik PTV-a zagrijava se pločastim kolektorima i električnim grijačem u slučaju kada energija od Sunca nije dovoljna da zadovolji potrebu za energijom, na Slici 1. prikazana je shema sunčanog sustava. Cilj rada je analiza i optimizacija sunčanog sustava. Analiza je provedena za klimatsko područje grada Zagreba i grada Splita, dok su simulacije provedene na satnoj i minutnoj bazi kroz cijelu godinu.

Svrha rada je usporedba rezultata simulacija sunčanog sustava sa spremnikom potrošne tople vode jednolike razdiobe temperature te sunčanog sustava s temperaturnom stratifikacijom spremnika tople vode. Uz navedeno, uspoređeni su i rezultati simulacija s rezultatima proračuna prema normi HRN EN 15316-4-3.

Kako bi se odredio utjecaj temperaturne stratifikacije spremnika na učinkovitost sunčanog sustava spremnik je modeliran na način da je podijeljen u više izotermnih segmenata jednakog volumena. Smještaj izmjenjivača topline, dodatnog grijača te priključaka određen je prema tehničkim karakteristikama uređaja proizvođača *Hoval d.o.o.*, dok je dimenzioniranje glavnih komponenata sunčanog sustava (sunčani kolektor, spremnik potrošne tople vode) provedeno korištenjem iskustvenih podataka prema literaturi [1]. Računalne simulacije provedene su korištenjem računalnog programa TRNSYS i MATLAB. Crteži i sheme izrađeni su u programskom paketu AutoCAD.



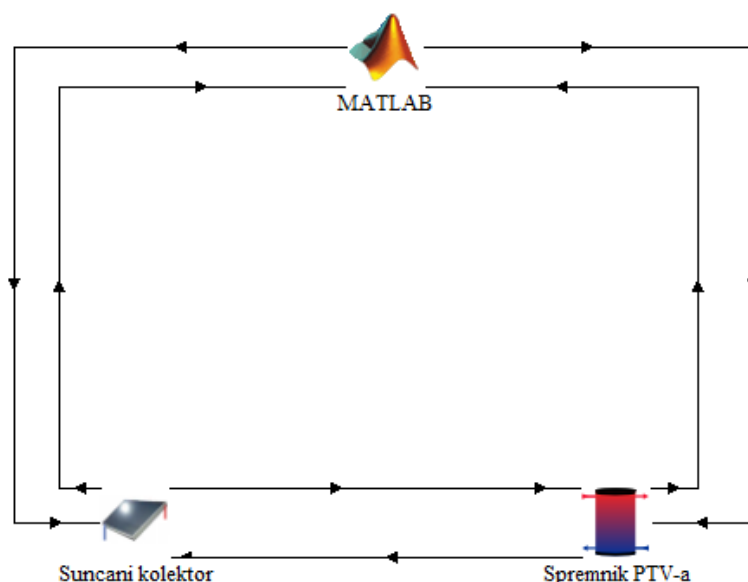
**Slika 1. Shema sunčanog sustava**



## 2. Modeliranje sunčanog sustava u računalnom programu TRNSYS

### 2.1. Model sunčanog sustava

Simulacija rada sunčanog sustava napravljena je korištenjem računalnog programa TRNSYS. TRNSYS je računalni program koji se koristi za simulaciju rada dinamičkih, energetskih sustava te se sastoji od dva dijela. Prvi dio sustava je procesor (*kernel*) koji čita i obrađuje ulazne podatke, iterativno rješava sustav, određuje konvergenciju te prikazuje izlazne podatke. Drugi dio je velika baza komponenata od kojih svaka modelira ponašanje dijela promatranog sustava. U ovoj simulaciji rada sunčanog sustava korištene su komponente sunčanog kolektora (*Type 1*), spremnika potrošne tople vode (*Type 534*) te komponenta za povezivanje TRNSYS-a i MATLAB-a (*Type 155*), kako je prikazano na Slici 2.



Slika 2. Shema simulacije sunčanog sustava u računalnom programu TRNSYS

Na shemi su prikazane veze između komponenata simulacije kojima se definiraju ulazni parametri pojedine komponente potrebni za odvijanje simulacije. Skriptom u MATLAB-u su definirani ulazni parametri komponenata simulacije (vremenski podaci i potrošnja PTV-a) te regulacija rada cirkulacijske pumpe sunčanog sustava i električnog grijača. Također, MATLAB je korišten za obradu i analizu rezultata simulacije. U nastavku će biti opisani matematički modeli komponente sunčanog kolektora i toplinskog spremnika.

## 2.2. Sunčani kolektor – Type 1

Komponenta *Type 1* modelira toplinski učinak sunčanog kolektora korištenjem kvadratne jednadžbe učinkovitosti kolektora [2]:

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} - F_R U_{L/T} \frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \quad (1)$$

$$\eta = a_0 - a_1 \frac{\Delta T}{I_T} - a_2 \frac{(\Delta T)^2}{I_T} \quad (2)$$

pri čemu su:

A	površina ostakljenog dijela sunčanog kolektora [m <sup>2</sup> ]
a <sub>0</sub>	koeficijent učinkovitosti sunčanog kolektora pri razlici srednje temperature radnog medija i zraka od 0 K [-]
a <sub>1</sub>	koeficijent učinkovitosti sunčanog kolektora prvog reda [W/m <sup>2</sup> K]
a <sub>2</sub>	koeficijent učinkovitosti sunčanog kolektora drugog reda [W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ]
F <sub>R</sub>	ukupni koeficijent učinkovitosti kolektora [-]
I <sub>T</sub>	globalno sunčevo zračenje na nagnutu plohu [kJ/hm <sup>2</sup> ]
Q <sub>u</sub>	dobici energije sunčanog kolektora [kJ/h]
T <sub>i</sub>	temperatura fluida na ulazu u sunčani kolektor [°C]
T <sub>o</sub>	temperatura fluida na izlazu iz sunčanog kolektora [°C]
T <sub>a</sub>	temperatura vanjskog zraka [°C]
U <sub>L</sub>	ukupni koeficijent toplinskih gubitaka sunčanog kolektora [kJ/hm <sup>2</sup> K]
U <sub>L/T</sub>	ukupni koeficijent toplinskih gubitaka sunčanog kolektora u ovisnosti o temperaturi [kJ/hm <sup>2</sup> K]
(τ $\alpha$ ) <sub>n</sub>	umnožak apsorpcije apsorbera i transmisije pokrovnog stakla kolektora pri okomitom kutu upada sunčevog zračenja [-]

Koeficijenti učinkovitosti sunčanog kolektora mogu biti izraženi u ovisnosti o ulaznoj, izlaznoj ili srednjoj temperaturi radnog medija.

$$\Delta T = \begin{cases} \Delta T_i = T_i - T_a \\ \Delta T_{av} = T_{av} - T_a \\ \Delta T_o = T_o - T_a \end{cases} \quad (3)$$

Koeficijenti učinkovitosti sunčanog kolektora korištenog u simulaciji izraženi su prema srednjoj radnoj temperaturi sunčanog kolektora. Stoga se u tom slučaju primjenjuju korekcijski faktori:

$$U'_L = U_L + U_{L/T} \quad (4)$$

$$\eta = \frac{Q_u}{A I_T} = F_R(\tau\alpha)_n - F_R U'_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (5)$$

$$F_R(\tau\alpha) = F_{av}(\tau\alpha)_n \left( \frac{\dot{m}_{test} c_p}{\dot{m}_{test} c_p + \frac{F_{av} U'_L}{2}} \right) \quad (6)$$

$$F_R U'_L = F_{av} U'_L \left( \frac{\dot{m}_{test} c_p}{\dot{m}_{test} c_p + \frac{F_{av} U'_L}{2}} \right) \quad (7)$$

pri čemu su:

$c_p$	specifični toplinski kapacitet radnog medija kolektora [kJ/kgK]
$F_{av}$	korigirana vrijednost $F_R$ kada je učinkovitost kolektora zadana u ovisnosti o srednjoj temperaturi, $T_{av}$ [-]
$\dot{m}_{test}$	protok radnog medija pri ispitivanju učinkovitosti sunčanog kolektora [kg/h]

Korekcija protoka radnog medija provodi se zbog različitog protoka radnog medija kroz kolektor u odnosu na protok pri testiranju učinkovitosti kolektora

$$r_1 = \frac{(F_R U'_L)_{use}}{(F_R U'_L)_{test}} = \frac{(F_R(\tau\alpha)_n)_{use}}{(F_R(\tau\alpha)_n)_{test}} = \frac{\left( \frac{\dot{m} c_p}{A F' U'_L} \left( 1 - e^{-A F' U'_L / \dot{m} c_p} \right) \right)_{use}}{\left( \frac{\dot{m} c_p}{A F' U'_L} \left( 1 - e^{-A F' U'_L / \dot{m} c_p} \right) \right)_{test}} \quad (8)$$

$$F' U'_L = - \frac{\dot{m} c_p}{A} \ln \left( 1 - \frac{F_R U'_L A}{\dot{m} c_p} \right) \quad (9)$$

U Tablici 1. prikazani su parametri, te ulazni i izlazni podaci komponente sunčanog kolektora, pri čemu su tehničke karakteristike preuzete iz kataloga sunčanih kolektora proizvođača opreme *Hoval d.o.o.*

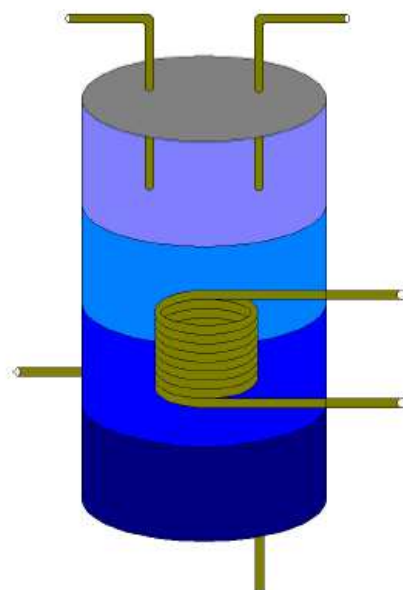
Parametri komponente	Vrijednost	Mjerna jedinica
Broj kolektora u serijskom spoju	1	-
Površina kolektora	4,8	m <sup>2</sup>
Protok pri ispitivanju učinkovitosti kolektora	0,019	kg/sm <sup>2</sup>
Učinkovitost kolektora pri $\Delta T = 0$ K	0,851	-
Koeficijent učinkovitosti prvog reda	4,107	W/m <sup>2</sup> K
Koeficijent učinkovitosti drugog reda	0,016	W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>
Ulazni podaci komponente	Mjerna jedinica	
Temperatura radnog medija na ulazu u kolektor	°C	
Protok radnog medija	kg/h	
Temperatura vanjskog zraka	°C	
Zračenje na nagnutu plohu	kJ/hm <sup>2</sup>	
Globalno zračenje na horizontalnu plohu	kJ/hm <sup>2</sup>	
Difuzno zračenje na horizontalnu plohu	kJ/hm <sup>2</sup>	
Refleksivnost tla	-	
Kut upada sunčevog zračenja	°	
Nagib kolektora	°	
Izlazni podaci komponente	Mjerna jedinica	
Temperatura radnog medija n izlazu iz kolektora	°C	
Protok fluida na izlazu iz kolektora	°C	
Dobitak energije sunčanog kolektora	kJ/h	

**Tablica 1. Parametri, ulazni i izlazni podaci komponente sunčanog kolektora**

### 2.3. Spremnik potrošne tople vode – *Type 534*

U nastavku ovog poglavlja opisan je matematički model komponente spremnika tople vode prema literaturi [3]. Komponenta modelira spremnik konstantnog volumena s uronjenim izmjenjivačem topline. Radni medij (voda) u spremniku izmjenjuje toplinu s radnim medijem u izmjenjivaču topline (smjesa vode i glikola) i okolišem (gubici topline preko oplate spremnika) te u ovisnosti o ulaznim i izlaznim protocima vode. Spremnik je podijeljen u segmente jednakog volumena kako je prikazano na Slici 3. Pretpostavka modela je da je svaki segment toplinskog spremnika izoterman, a interakcija između segmenata modelirana je kao:

- provođenje topline između segmenata
- strujanje fluida između segmenata uslijed postojanja temperaturnih inverzija (uzgonske sile) ili zbog protoka ulaznih i izlaznih struja.



Slika 3. Model spremnika tople vode [3]

Komponentom *Type 534* moguće je definirati više tipova izmjenjivača topline: horizontalni cijevni izmjenjivač, vertikalni cijevni izmjenjivač, serpentinski izmjenjivač te spiralni cijevni izmjenjivač topline. Također je moguće modelirati izmjenu topline tri različita protoka fluida, dva protoka koji se miješaju sa fluidom u spremniku te treći gdje se izmjena topline odvija

između fluida u spremniku i fluida u izmjenjivaču topline. Za svaki definirani ulaz fluida u spremnik potrebno je definirati izlaz.

Izmjena topline između izmjenjivača topline te vode u spremniku odvija se prirodnom konvekcijom. Ukupni koeficijent prolaza topline izražen je prema sljedećoj jednažbi

$$\frac{n}{UA} = \frac{1}{\alpha_u A_u} + \frac{\ln\left(\frac{r_v}{r_u}\right)}{2\pi L_c \lambda_c} + \frac{1}{\alpha_v A_v} \quad (10)$$

pri čemu su:

$A_u$	unutarnja površina segmenta cijevi izmjenjivača topline [m <sup>2</sup> ]
$A_v$	vanjska površina segmenta cijevi izmjenjivača topline [m <sup>2</sup> ]
$d_{hx}$	promjer izmjenjivača topline [m]
$d_u$	unutarnji promjer cijevi izmjenjivača topline [m]
$d_v$	vanjski promjer cijevi izmjenjivača topline [m]
$L_c$	duljina segmenta cijevi izmjenjivača topline [m]
$n$	broj cijevi izmjenjivača topline [-]
$r$	radijus cijevi izmjenjivača topline [m]
$UA$	ukupni koeficijent prolaza topline [W/K]
$\alpha_u$	koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane cijevi izmjenjivača topline [W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha_v$	koeficijent prijelaza topline s vanjske strane cijevi izmjenjivača topline [W/m <sup>2</sup> K]
$\lambda_c$	toplinska vodljivost materijala cijevi izmjenjivača topline [W/mK]
$\lambda_u$	toplinska vodljivost radnog medija [W/mK]
$\lambda_u$	toplinska vodljivost vode [W/mK]
$\mu$	dinamička viskoznost [Pas]

Koeficijent prijelaza topline na vanjskoj stjenki izmjenjivača topline računa se prema:

$$\alpha_v = Nu_d * \frac{\lambda_w}{d_v} \quad (11)$$

$$Nu_d = C * (Ra)^n * (GF)^m \quad (12)$$

Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane cijevi izmjenjivača topline ovisi o tipu izmjenjivača topline te o svojstvima fluida u izmjenjivaču. Profil strujanja u cijevi izmjenjivača topline je izobražen. Koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane cijevi računa se prema:

$$\alpha_u = Nu_{hx} \frac{\lambda_u}{d_u} \quad (13)$$

gdje se Nusseltov broj za laminarno strujanje u cijevi računa prema:

$$Nu_{hx} = \left[ \left( \frac{48}{11} + \frac{\frac{51}{11}}{1 + \left( \frac{1342}{Pr_{hx}} \right)^2} \right) + 1,816 \left( \frac{HE}{1 + \frac{1,15}{Pr_{hx}}} \right)^{1,5} \right]^{\left(\frac{1}{3}\right)} \quad (14)$$

$$HE = \frac{Re_{hx} \left( \frac{d_u}{d_{hx}} \right)^{0,5}}{1 + \left( \frac{h_c}{\pi d_u} \right)^2} \quad (15)$$

a za turbulentno strujanje prema:

$$Nu_{hx} = 0,023 Re_{hx}^{0,85} Pr_{hx}^{0,4} \left( \frac{d_u}{d_{hx}} \right)^{0,1} \quad (16)$$

U slučajevima kada ne postoji protok radnog medija kroz izmjenjivač topline,  $Nu = 1$ .

Reynoldsov i Prandtlov broj računaju se prema:

$$Re_{hx} = \frac{4\dot{m}}{\pi d_u \mu} \quad (17)$$

$$Pr_{hx} = c_p \frac{\mu}{\lambda} \quad (18)$$

$$Re_{krit} = 20000 \left( \frac{d_u}{d_{hx}} \right)^{0,32} \quad (19)$$

Konačno, izmjena topline između izmjenjivača topline i vode u spremniku računa se prema:

$$Q_{hx} = UA(T_{sprem} - T_{hx}) \quad (19)$$

Izmjena topline između spremnika i okoline računa se prema:

$$Q_{loss} = UA(T_{sprem} - T_o) \quad (20)$$

Izmjena topline između segmenata spremnika računa se prema:

$$Q_{cond,j} = \frac{\lambda_j A_j (T_j - T_{j+1})}{L_{cond,j}} + \frac{\lambda_{j-1} A_{j-1} (T_j - T_{j-1})}{L_{cond,j-1}} \quad (21)$$

pri čemu su:

$A_j$	površina izmjene topline između segmenta spremnika i segmenta ispod [ $m^2$ ]
$A_{j-1}$	površina izmjene topline između segmenta spremnika i segmenta iznad [ $m^2$ ]
$L_{cond,j}$	visinska razlika između središta segmenta i središta segmenta ispod [m]
$L_{cond,j-1}$	visinska razlika između središta segmenta i središta segmenta iznad [m]
$T_j$	temperatura fluida promatranog segmenta [ $^{\circ}C$ ]
$T_{j+1}$	temperatura segmenta spremnika ispod promatranog segmenta [ $^{\circ}C$ ]
$T_{j-1}$	temperatura segmenta spremnika iznad promatranog segmenta [ $^{\circ}C$ ]
$\lambda_j$	koeficijent toplinske vodljivosti promatranog segmenta (određen prema srednjoj temperaturi promatranog segmenta i segmenta ispod) [W/mK]
$\lambda_{j+1}$	koeficijent toplinske vodljivosti promatranog segmenta (određen prema srednjoj temperaturi promatranog segmenta i segmenta iznad) [W/mK]



Kod definiranja parametara modela spremnika potrebno je odrediti lokaciju ulaznog i izlaznog priključka spremnika. Pretpostavka modela je da se fluid koji ulazi u spremnik potpuno miješa s fluidom u segmentu gdje se nalazi ulazni priključak. Zatim prelazi u sljedeći segment spremnika prema izlaznom priključku. Temperatura na izlazu iz spremnika jednaka je srednjoj temperaturi segmenta spremnika gdje se nalazi izlazni priključak. Izmjena topline uslijed strujanja između segmenata u spremniku računa se prema:

$$Q_{\text{flow},i,j} = \dot{m}_{\text{in}} f_{\text{in},j} c_p T_{\text{in}} + \dot{m}_{\text{in},j-1} c_p T_{j-1} + \dot{m}_{\text{in},j+1} c_p T_{j+1} - \dot{m}_{\text{push}} c_p T_j \quad (22)$$

pri čemu su:

$c_p$	specifični toplinski kapacitet [kJ/kgK]
$f_{\text{in},j}$	udio masenog protoka fluida u spremnik koji ulazi u promatrani segment (ako cijeli protok ulazi u segment $f_{\text{in},j} = 1$ )
$\dot{m}_{\text{in}}$	maseni protok fluida koji ulazi u spremnik [kg/h]
$\dot{m}_{\text{in},j-1}$	maseni protok fluida između promatranog segmenta i segmenta iznad [kg/h]
$\dot{m}_{\text{in},j+1}$	maseni protok fluida između promatranog segmenta i segmenta ispod [kg/h]
$\dot{m}_{\text{push}}$	maseni protok fluida koji izlazi iz spremnika [kg/h]
$T_{\text{in}}$	temperatura fluida koji ulazi u spremnik [°C]

Uslijed rada sunčanog sustava unutar spremnika se mogu pojaviti temperaturne inverzije između segmenata. Miješanje uzrokovano silom uzgona računa se na način da se izračunaju temperature svih segmenata te se na kraju koraka simulacije izmiješa fluid između segmenata gdje postoji temperaturna inverzija. Izmjena topline miješanjem između segmenata računa se prema:

$$Q_{\text{mix},j} = \dot{m}_j c_{p,j} (T_j - T_{j+1}) + \dot{m}_{j-1} c_{p,j-1} (T_j - T_{j-1}) \quad (23)$$

pri čemu su:

$\dot{m}_j$	maseni protok uslijed miješanja fluida promatranog segmenta i segmenta ispod [kg/h]
$\dot{m}_{j-1}$	maseni protok uslijed miješanja fluida promatranog segmenta i segmenta ispod [kg/h]

Prethodnim izrazima definirane su jednadžbe prema kojima se računaju toplinski tokovi za svaki segment toplinskog spremnika. Energetska bilanca segmenta spremnika glasi:

$$\frac{dT_{\text{tank},j}}{dt} = \frac{Q_{\text{aux},j} - Q_{\text{hx},j} - Q_{\text{loss},j} - Q_{\text{flow},i,j} - Q_{\text{mix},j}}{C_{\text{Tank},j}} \quad (24)$$

Kako bi se analitički riješila, diferencijalna jednadžba bilance spremnika pretvara se u oblik:

$$\frac{dT}{dt} = a * T + b \quad (25)$$

gdje su:

$T$  zavisna varijabla [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t$  vrijeme [h]

$a$  konstanta [ $1/\text{h}$ ]

$b$  funkcija vremenske ili zavisne varijable, sadrži vrijednosti temperatura segmenata [ $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ]

Ako je  $b$  konstanta, postoji rješenje diferencijalne jednadžbe, a ako  $b$  nije konstanta tada se aproksimacija analitičkog rješenja nalazi pretpostavkom da je  $b$  konstanta tijekom koraka simulacije te da je jednaka srednjoj vrijednosti,  $b_{sr}$  određuje se iteracijom sljedećih jednadžbi:

$$T_{\text{konačna}} = \left( T_{\text{početna}} + \frac{b_{sr}}{a} \right) * e^{(a\Delta t)} - \frac{b_{sr}}{a} \quad (26)$$

$$b_{sr} = b(T_{sr}) \quad (27)$$

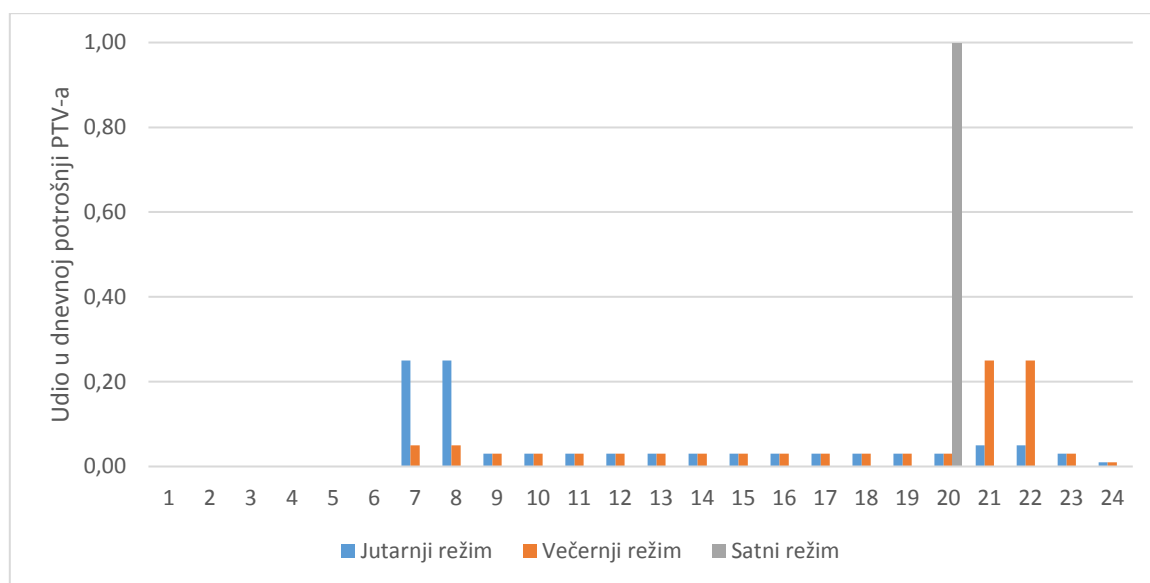
$$T_{sr} = \frac{1}{a\Delta t} * \left( T_{\text{početna}} + \frac{b_{sr}}{a} \right) * (e^{(a\Delta t)} - 1) - \frac{b_{sr}}{a} \quad (28)$$

Iterativni postupak rješavanja jednadžbi 26 – 28 računalnog programa TRNSYS je sljedeći: postaviti diferencijalnu jednadžbu u odgovarajući oblik, odrediti konstante  $a$  i  $b_{sr}$  te odrediti  $T_{konačna}$  i  $T_{sr}$ , zatim ponovo izračunati konstantu  $b_{sr}$  te ponavljati postupak dok temperature  $T_{konačna}$  i  $T_{sr}$  ne konvergiraju.

### 3. Tehnički opis sustava

#### 3.1. Potrošnja tople vode

Kako bi se mogao dimenzionirati sustav za pripremu potrošne tople vode bilo je potrebno odrediti dnevnu potrošnju za tipičnu obiteljsku kuću. Potrošnja tople vode određena je za četveročlanu obitelj prema iskustvenim podacima [4] i iznosi 200 l vode dnevno temperature 60°C. U svrhu ispitivanja utjecaja režima potrošnje tople vode tijekom dana na energetske bilancu sunčanog sustava simulirana su tri režima potrošnje tople vode, prikazana na Slici 4.



Slika 4. Dnevna potrošnja PTV-a za tri analizirana režima potrošnje

Večernji i jutarnji režim potrošnje tople vode predstavljaju uobičajene navike ukućana. Satnim režimom simulira se najnepovoljniji slučaj potrošnje tople vode, odnosno naglo pražnjenje spremnika tople vode u večernjim satima te ponovno zagrijavanje tople vode dodatnim grijačem, u ovom slučaju električnim grijačem.

### 3.2. Dimenzioniranje sunčanog sustava

Spremnik potrošne tople vode dimenzioniran je prema dnevnoj potrošnji tople vode. Kako bi se ispitao utjecaj veličine spremnika na učinkovitost sunčanog sustava odabrana su dva spremnika zapremine 220 l i 320 l kao tip CombiVal CR200 i CR300, proizvođača *Hoval d.o.o.* Spremnik ima jedan izmjenjivač topline za sunčani sustav te dodatni električni grijač za grijanje vode u slučaju kada prinos energije sunčanih kolektora nije dostatan. Električni grijač održava temperaturu vode u spremniku od 60°C te se isključuje u slučaju kada radi pumpa kruga kolektora. Tehničke karakteristike spremnika tople vode CombiVal CR200 i CR300 [5] dane su u Tablici 2.:

Tehničke karakteristike spremnika	CombiVal CR200	CombiVal CR300
Zapremnina spremnika, V [l]	220	320
Visina spremnika, h [m]	1,43	1,93
Promjer spremnika, d [m]	0,68	0,68
Površina izmjenjivača topline, $A_{hx}$ [m <sup>2</sup> ]	0,9	1,2
Snaga električnog grijača, $P_{el}$ [kW]	3	3

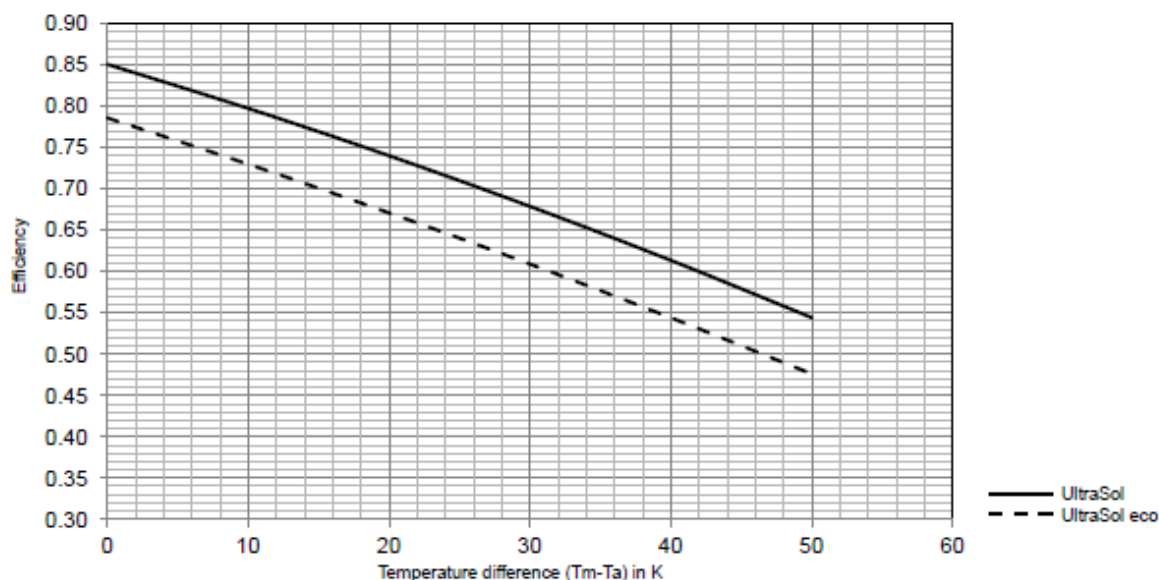
Tablica 2. Tehničke karakteristike spremnika potrošne tople vode

Potrebna površina solarnih kolektora određena je prema iskustvenim podacima [1] te za obiteljske kuće iznosi 1 m<sup>2</sup>/osobi. što rezultira ukupnom površinom od 4 m<sup>2</sup> za slučaj analiziran u ovom radu. Odabrana su dva pločasta kolektora tip UltraSol proizvođača *Hoval d.o.o.* Tehničke karakteristike sunčanog kolektora [5] dane su u Tablici 3.:

Tehničke karakteristike sunčanog kolektora	UltraSol
Površina kolektora, A [m <sup>2</sup> ]	2,54
Površina ostakljenog dijela kolektora, $A_{ap}$ [m <sup>2</sup> ]	2,40
Površina apsorbera, $A_a$ [m <sup>2</sup> ]	2,36
Učinkovitost kolektora, $\eta_0$ [-]	0,851
Koeficijent toplinskih gubitaka prvog reda, $a_1$ [W/m <sup>2</sup> K]	4,107
Koeficijent toplinskih gubitaka drugog reda, $a_2$ [W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ]	0,016
Protok radnog medija (smjesa vode i glikola), $q_m$ [l/hm <sup>2</sup> ]	15 - 50

Tablica 3. Tehničke karakteristike sunčanog kolektora

Za odabrane kolektore predviđeno je spajanje paralelnim spojem te orijentacija kolektora prema jugu s nagibom od  $45^\circ$ . Ukupna instalirana površina kolektora iznosi  $5,08 \text{ m}^2$ . Na Slici 5. prikazana je učinkovitost kolektora u ovisnosti od razlici srednje radne temperature kolektora i vanjske temperature.



Slika 5. Učinkovitost sunčanog kolektora [5]

Učinkovitost kolektora opada s povećanjem radne temperature kolektora u odnosu na vanjsku temperaturu. Stoga je potrebno osigurati da sustav radi sa što manjim razlikama između radne temperature kolektora i vanjskog zraka. Sunčani sustav je smješten u području sa zimskim temperaturama ispod  $0^\circ\text{C}$  te je s ciljem sprječavanja zamrzavanja radnog medija u krugu kolektora za radni medij odabrana smjesa vode i glikola Tyfocor LS [6]. Protok smjese vode i glikola za vrijeme rada cirkulacijske pumpe kruga kolektora određen je prema preporukama proizvođača te iznosi  $200 \text{ l/h}$ .

### 3.3. Regulacija rada sunčanog sustava

Regulacija rada sunčanog sustava jedan je od najutjecajnijih faktora učinkovitosti sustava. U ovom radu regulacija rada sunčanog sustava modelirana je u računalnom programu MATLAB, a provedena je očitavanjem temperatura na izlazu iz sunčanog kolektora, očitavanjem temperature pri vrhu spremnika te očitavanjem temperature na izlazu iz izmjenjivača topline spremnika. Kako u ovoj simulaciji nisu modelirani toplinski gubici cjevovoda kolektorskog kruga, temperatura na izlazu iz izmjenjivača topline jednaka je temperaturi na ulazu u sunčani kolektor.

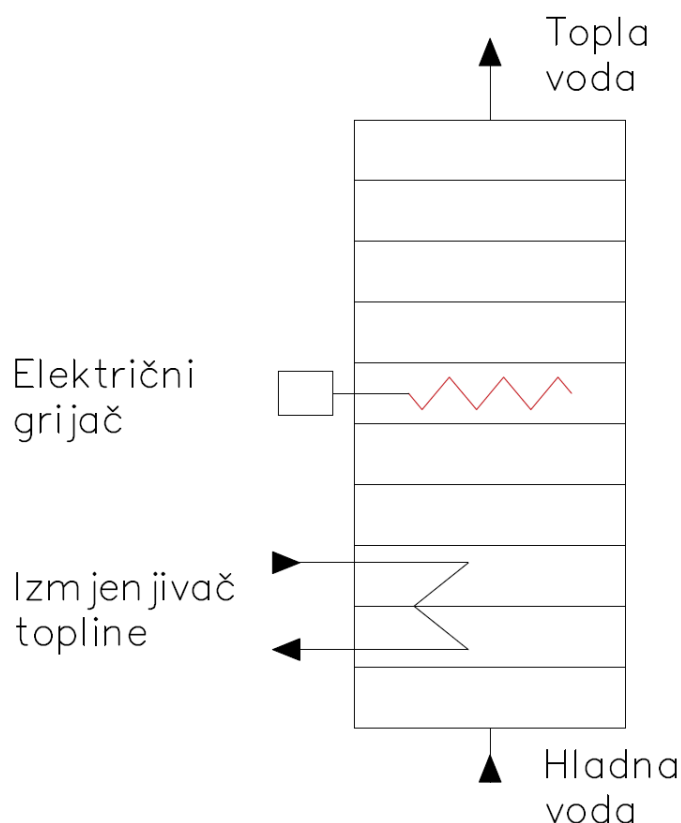
Regulacija rada cirkulacijske pumpe kruga sunčanog kolektora provedena je na način da je za svaki korak simulacije izračunata učinkovitost kolektora prema radnoj temperaturi kolektora te su na temelju izračunate učinkovitosti izračunati toplinski dobici sunčanih kolektora. Pumpa se uključuje ako su dobici topline sunčanih kolektora dovoljni za povećanje temperature cjelokupnog protoka radnog medija u koraku simulacije za 3°C. Pumpa je uključena sve dok je razlika izlazne i ulazne temperature radnog medija u kolektoru veća ili jednaka 3°C. Kako bi se spriječila pojava vrlo visokih temperatura u spremniku tople vode regulator isključuje cirkulacijsku pumpu u slučaju da temperatura pri vrhu spremnika poraste iznad 90°C, što je maksimalna radna temperatura spremnika definirana od strane proizvođača opreme *Hoval d.o.o.*

Dodatni grijač služi za održavanje temperature vode u spremniku (60°C) te za zagrijavanje vode pri potrošnji kada nema dobitaka energije sunčanog sustava. Regulator isključuje dodatni grijač u slučaju rada cirkulacijske pumpe kruga sunčanih kolektora.

## 4. Rezultati simulacije rada sunčanog sustava

### 4.1. Rezultati simulacija sunčanog sustava sa stratifikacijskim modelom spremnika

Utjecaj stratifikacije temperature u spremniku tople vode ispitan je na sunčanom sustavu opisanom u prethodnom poglavlju. Spremnik tople vode podijeljen je u deset izotermnih segmenata jednakog volumena. Shema smještaja izmjenjivača topline, električnog grijača te priključaka spremnika prikazana je na Slici 6.

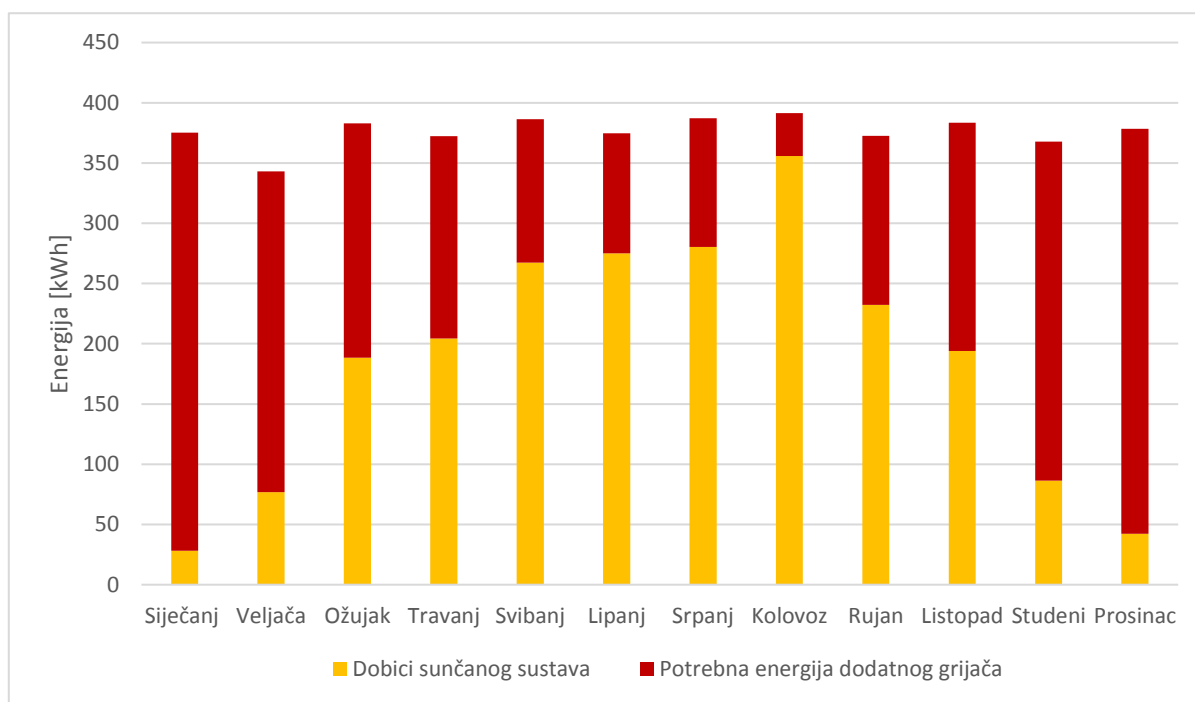


**Slika 6. Shema stratifikacijskog modela spremnika potrošne tople vode**

Spremnik je smješten u prostoru konstantne temperature zraka ( $15^{\circ}\text{C}$ ) dok je temperatura hladne vode ( $10^{\circ}\text{C}$ ) koja ulazi u spremnik pretpostavljena konstantnom tijekom cijele godine. Simulacija je provedena za klimatsko područje grada Zagreba i grada Splita, korak simulacije iznosio je 1 sat.

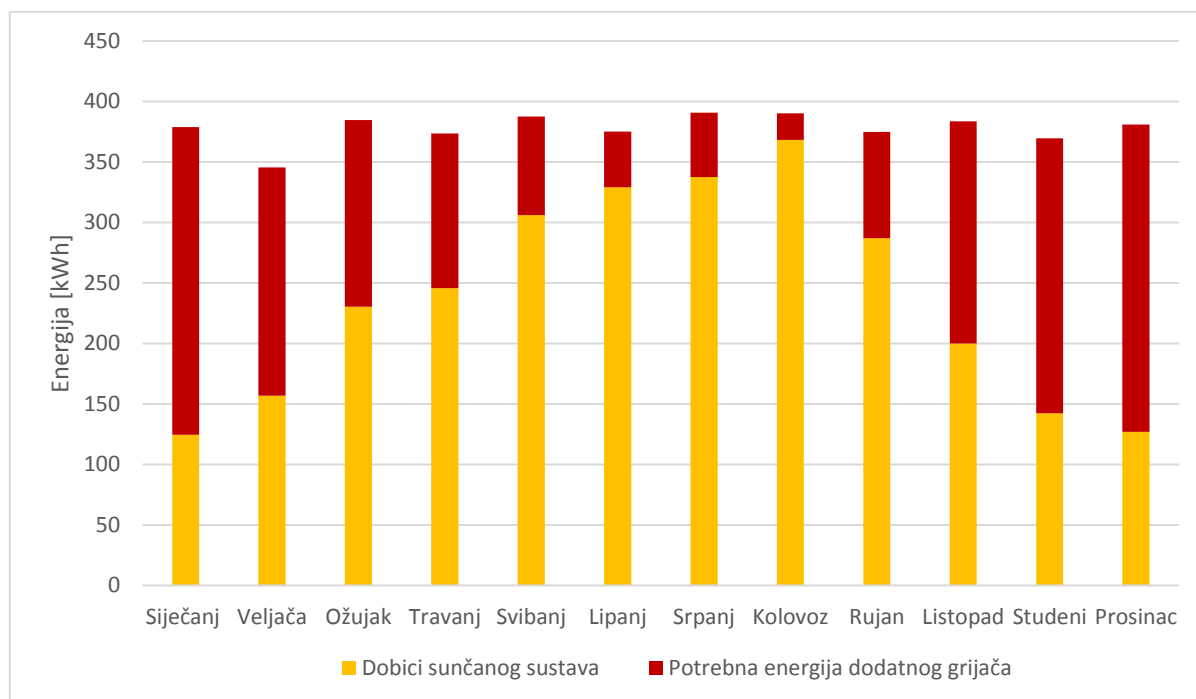


Na Slici 7. prikazana je usporedba toplinskih dobitaka sunčanog sustava i potrebne energije dodatnog grijača za grad Zagreb. Sunčani sustav pokriva 49% potrebne toplinske energije godišnje, dok ukupni godišnji dobitci energije sunčanog sustava iznose 2231 kWh. Toplinski gubici spremnika iznose 256 kWh. Sunčani sustav zadovoljava veći dio potreba za energijom u ljetnim mjesecima, pri čemu u kolovozu zadovoljava 90% potreba, dok u siječnju zadovoljava svega 7,5% potreba za energijom.



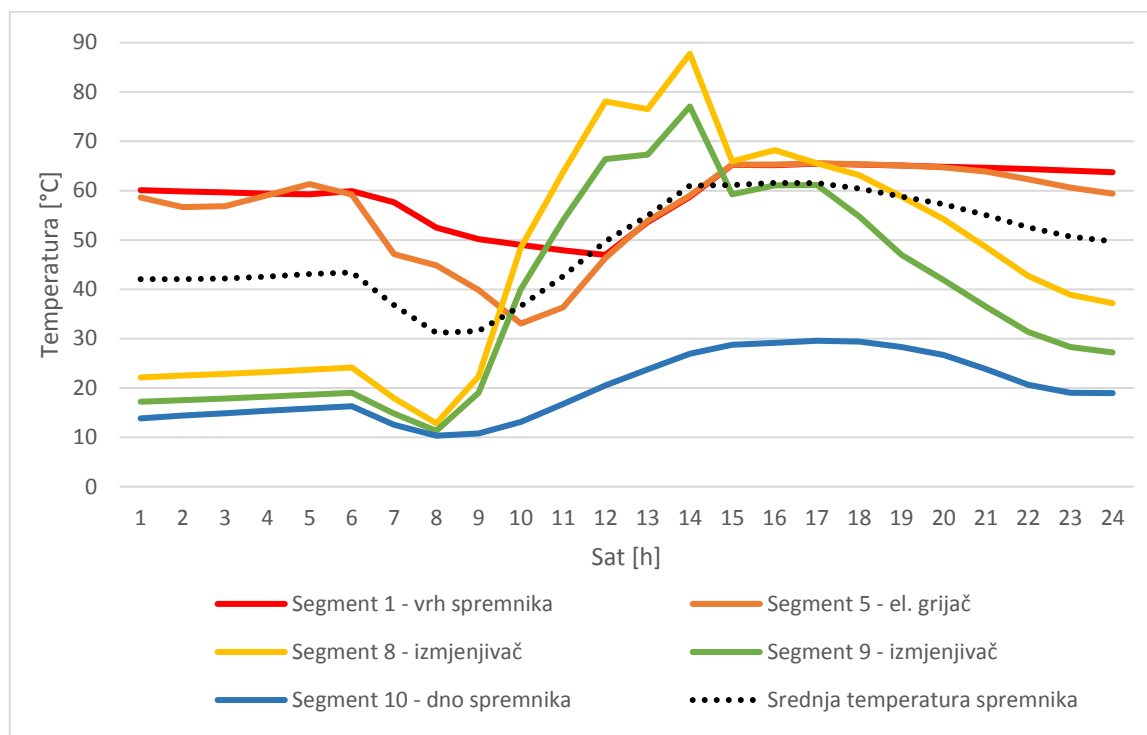
**Slika 7. Energetska bilanca sunčanog sustava za Zagreb, večernji režim potrošnje PTV-a, korak simulacije 1 sat**

Na Slici 8. prikazani su rezultati simulacije sunčanog sustava na području grada Splita. Sunčani sustav zadovoljava 63% potreba za toplotom, pri čemu godišnji dobitci energije sunčanog sustava iznose 2855 kWh. Dobici sunčanog sustava na području grada Splita veći su za 22% od dobitaka energije sustava za području grada Zagreba, pri čemu je najveća razlika vidljiva u zimskim mjesecima.



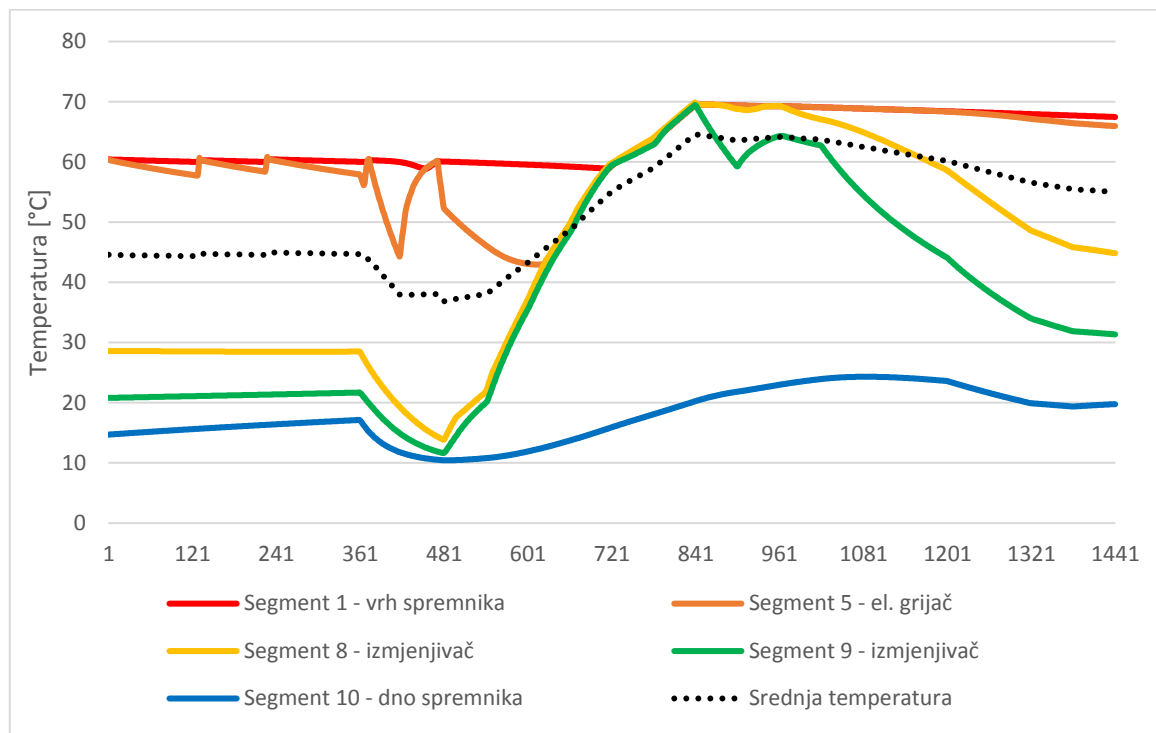
**Slika 8. Energetska bilanca sunčanog sustava za Split, večernji režim potrošnje PTV-a, korak simulacije 1 sat**

Kako bi se objasnio utjecaj koraka simulacije na rezultate simulacije analiziran je temperaturni profil stratifikacijskog spremnika potrošne tople vode u danu kada postoje dobici energije sunčanog sustava. Profil temperatura prikazan je na Slici 9.



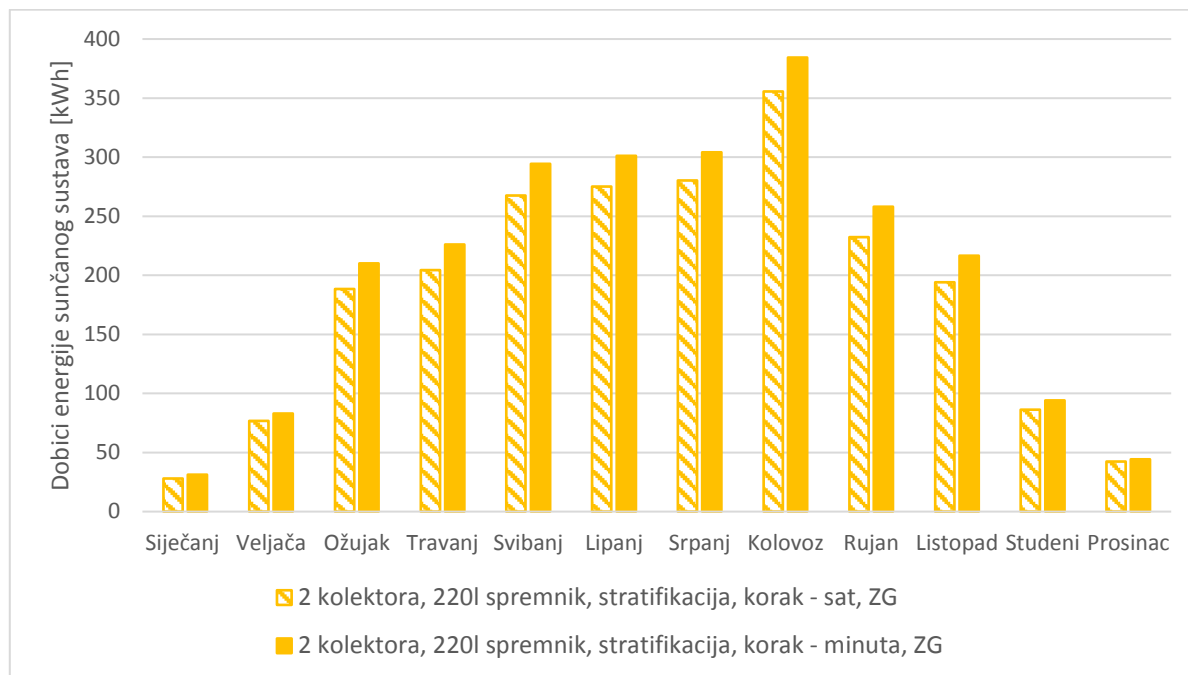
**Slika 9. Temperaturni profil spremnika za dan 1. kolovoz, jutarnji režim potrošnje PTV-a, grad Zagreb, korak simulacije 1 sat**

Na Slici 9. vidljivo je da u spremniku postoji temperaturna inverzija tijekom rada sunčanog sustava. Uzrok ovako izraženoj temperaturnoj inverziji je način na koji se modelira miješanje fluida između segmenata uzrokovano uzgonskim silama. Kod pojave temperaturne inverzije, miješanje se odvija na kraju koraka simulacije, na način da se pomiješaju segmenti gdje postoji temperaturna inverzija. Kako korak simulacije iznosi 1 sat, a segmenti u kojima je smješten izmjenjivač topline imaju mali volumen u odnosu na ukupni volumen spremnika, dolazi do pojave visokih temperatura u odnosu na ostale segmente spremnika. Visoka temperatura vode u segmentima gdje se nalazi izmjenjivač topline ima za posljedicu visoku radnu temperaturu sunčanog kolektora te dovodi do smanjenja učinkovitosti kolektora. Kako bi se izbjegle ovako izražene temperaturne inverzije korak simulacije smanjen je na 1 minutu te je ponovljena simulacija. Na Slici 10. prikazan je temperaturni profil stratifikacijskog spremnika PTV-a pri koraku simulacije od jedne minute.



**Slika 10. Temperaturni profil spremnika za dan 1. kolovoz, jutarnji režim potrošnje PTV-a, grad Zagreb, korak simulacije 1 minuta**

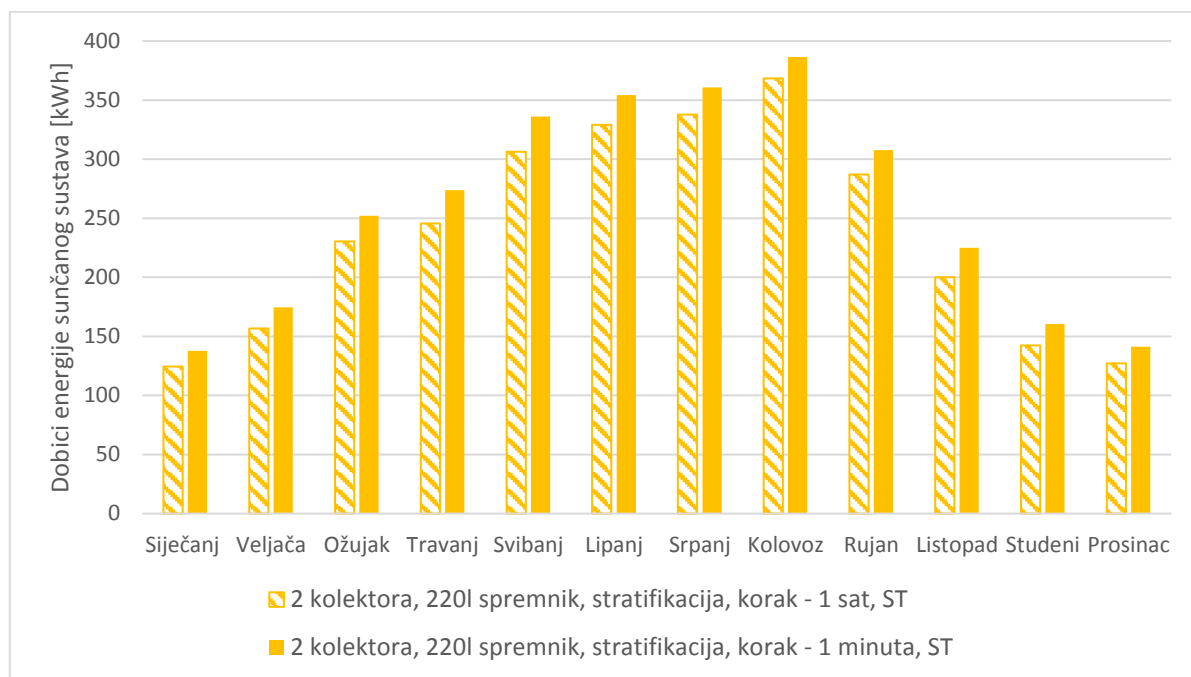
Prema profilu temperature toplinskog spremnika prikazanog na Slici 10. vidljivo je da se za minutnu simulaciju za razliku od satne ne pojavljuju temperaturne inverzije. Temperatura u segmentima gdje se nalazi izmjenjivač topline je niža međutim srednja temperatura spremnika tijekom perioda rada sunčanog sustava je viša, što za posljedicu ima veće toplinske gubitke spremnika. Na godišnjoj razini toplinski gubici spremnika prema simulaciji s korakom jedne minute su veći 20% u odnosu na simulaciju s korakom od jednog sata. Usporedba toplinskih dobitaka sunčanog sustava prikazana je na Slici 11.



**Slika 11. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava između satne i minutne simulacije, grad Zagreb**

Usporedbom rezultata simulacije vidljivo je da su dobitci energije sunčanog sustava prema rezultatima simulacije s korakom od jedne minute veći u odnosu na rezultate simulacije s korakom od jednog sata. Uzrok tomu je niža temperatura u segmentima gdje se nalazi izmjenjivač topline, prema rezultatima simulacije s korakom jedne minute, što za posljedicu ima veću učinkovitost sunčanih kolektora, a time više prikupljene energije od Sunca. Na godišnjoj razini dobitci energije veći su 9%. Potrebna energija dodatnog grijača, prema rezultatima simulacije s korakom od jedne minute, na godišnjoj razini iznosi 2084 kWh što je 8% manje u odnosu na potrebnu energiju prema rezultatima simulacije s korakom od jednog sata.

Na Slici 12. prikazana je usporedba dobitaka energije za sustav na području grada Splita. Usporedbom je uočeno povećanje u dobitcima energije sunčanog sustava, prema simulaciji s korakom jedne minute, kao i na području grada Zagreba. Dobici energije na godišnjoj razini veći su 8%. Potrebna energija dodatnog grijača iznosi 1453 kWh što je 14% manje u odnosu na potrebnu energiju dodatnog grijača prema simulaciji s korakom od jednog sata.



**Slika 12. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava između satne i minutne simulacije, grad Split**

#### 4.2. Rezultati simulacije rada sunčanog sustava sa spremnikom jednolike razdiobe temperature

U svrhu usporedbe rezultata simulacije sunčanog sustava sa stratifikacijskim spremnikom PTV-a, modeliran je sunčani sustav sa spremnikom jednolike razdiobe temperature. Simulacija je provedena za klimatsko područje grada Zagreba i grada Splita. Sunčani sustav sastoji se od dva sunčana kolektora i spremnika potrošne tople vode od 220 l koji je modeliran kao izoterman spremnik konstantnog volumena. Postavna temperatura električnog grijača za spremnik s jednolikom razdiobom temperature određena je prema srednjoj temperaturi stratifikacijskog spremnika. Srednja temperatura spremnika sa stratifikacijom određena je prema [7]:

$$\Delta T_{\text{srednja}} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \quad (29)$$

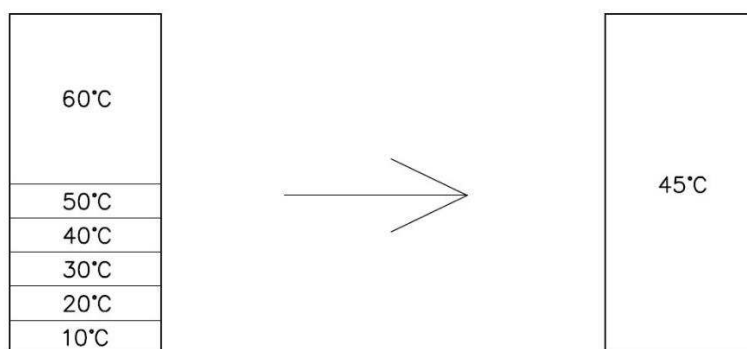
pri čemu je:

$\Delta T_{\text{srednja}}$  srednja temperatura spremnika sa stratifikacijom temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_i$  temperatura segmenta [ $^{\circ}\text{C}$ ]

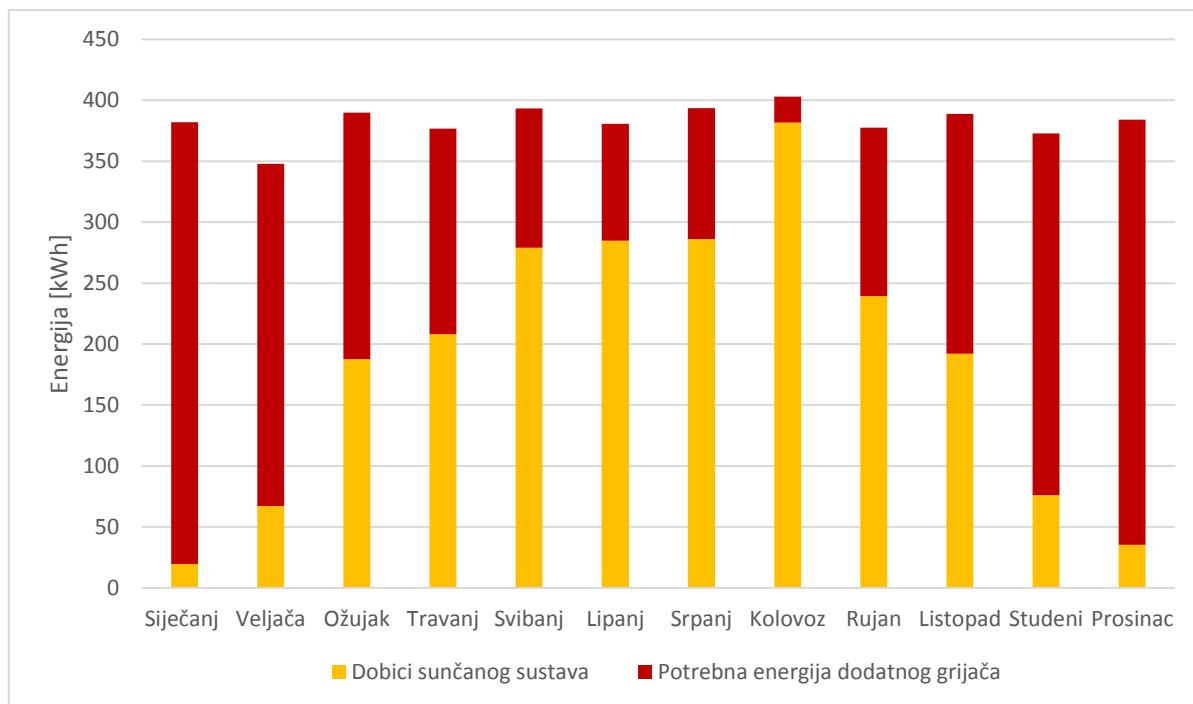
$V_i$  volumen segmenta [ $\text{m}^3$ ]

Kako je prema stratifikacijskom modelu spremnika pokazano da električni grijač održava postavnu temperaturu u dijelu spremnika koji se nalazi iznad grijača (Slika 10.), a u svrhu određivanja srednje temperature stratifikacijskog modela spremnika napravljena je aproksimacija razdiobe temperatura u spremniku kako je prikazano na Slici 13. te postavna temperatura električnog grijača za sustav sa spremnikom jednolike razdiobe temperature iznosi  $45^{\circ}\text{C}$ .



**Slika 13. Određivanje postavne temperature električnog grijača spremnika jednolike razdiobe temperature**

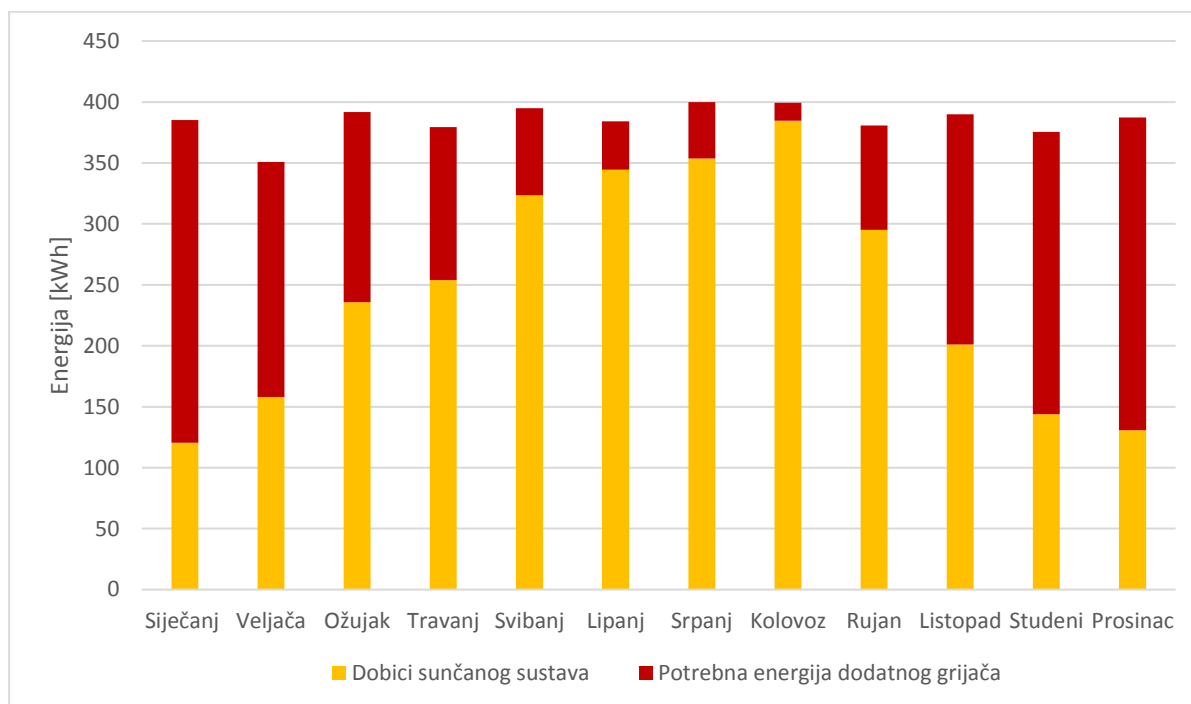
Na Slici 14. prikazana je usporedba toplinskih dobitaka sunčanog sustava sa spremnikom jednolike razdiobe temperature i potrebne energije dodatnog grijača za grad Zagreb. Sunčani sustav pokriva 49% potrebne toplinske energije godišnje, dok ukupni godišnji dobitci energije sunčanog sustava iznose 2257 kWh. Potrebna energija dodatnog grijača iznosi 2333 kWh, a toplinski gubici spremnika iznose 329 kWh.



**Slika 14. Energetska bilanca sunčanog sustava za Zagreb, večernji režim potrošnje PTV-a, spremnik s jednolikom razdiobom temperature**

Na Slici 15. prikazani su rezultati simulacije sunčanog sustava na području grada Splita. Sunčani sustav zadovoljava 64% potreba za toplinskom energijom, pri čemu godišnji dobitci energije sunčanog sustava iznose 2945 kWh. Potrebna energija dodatnog grijača iznosi 1673 kWh, a gubici topline spremnika potrošne tople vode iznose 355 kWh.

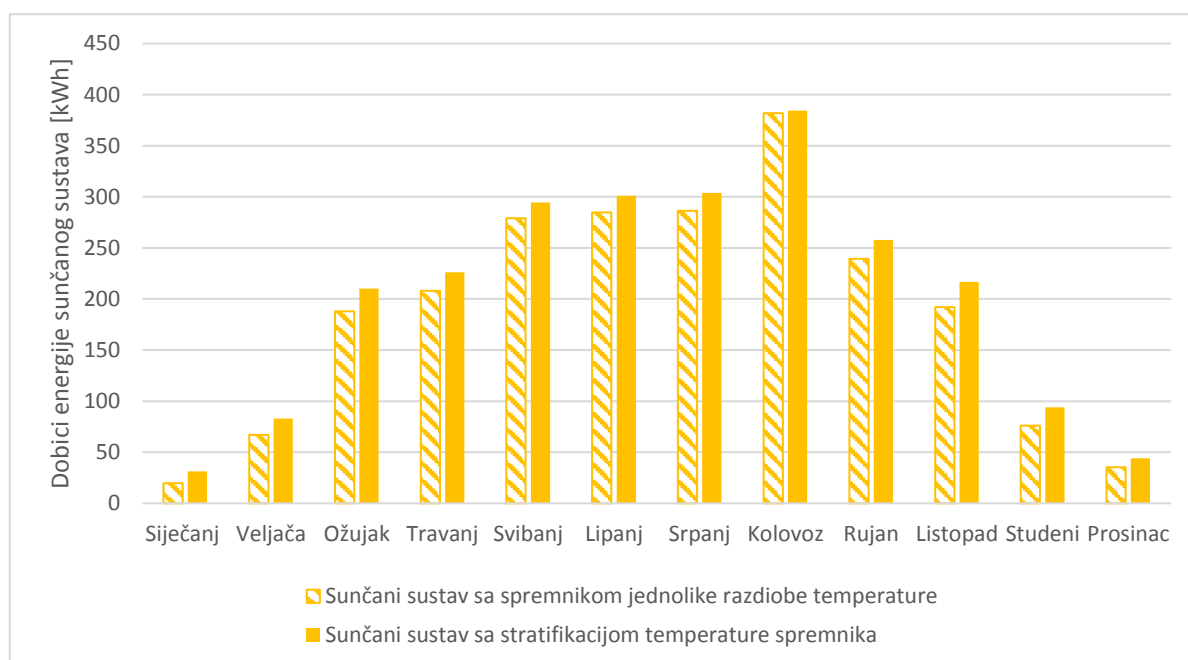




**Slika 15. Energetska bilanca sunčanog sustava za Split, večernji režim potrošnje PTV-a, spremnik s jednolikom razdiobom temperature**

#### 4.3. Usporedba rezultata simulacije sunčanog sustava sa spremnikom jednolike temperature i spremnika sa stratifikacijom temperature

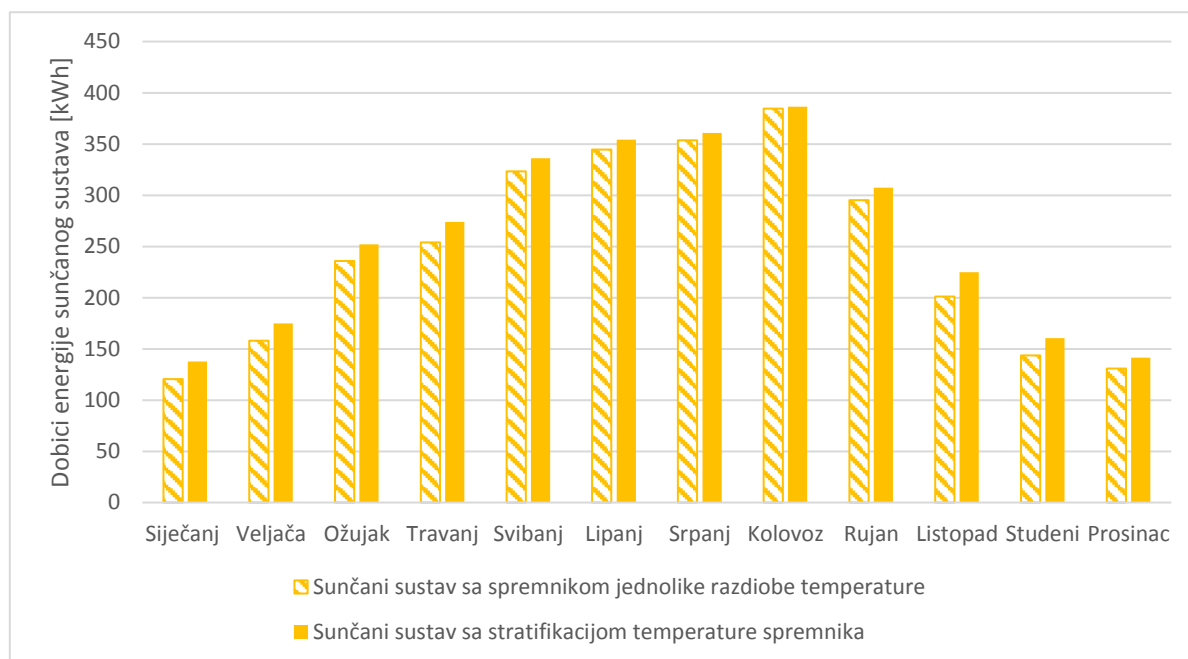
U ovom poglavlju uspoređeni su rezultati simulacije sunčanog sustava sa spremnikom jednolike temperature te spremnika s temperaturnom stratifikacijom. Simulacija je provedena za sustav na klimatskom području grada Zagreba te grada Splita. Na Slici 16. prikazana je usporedba dobitaka energije sunčanog sustava na području grada Zagreba.



**Slika 16. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava, stratifikacijski model spremnika i model spremnika s jednolikom razdiobom temperature za grad Zagreb**

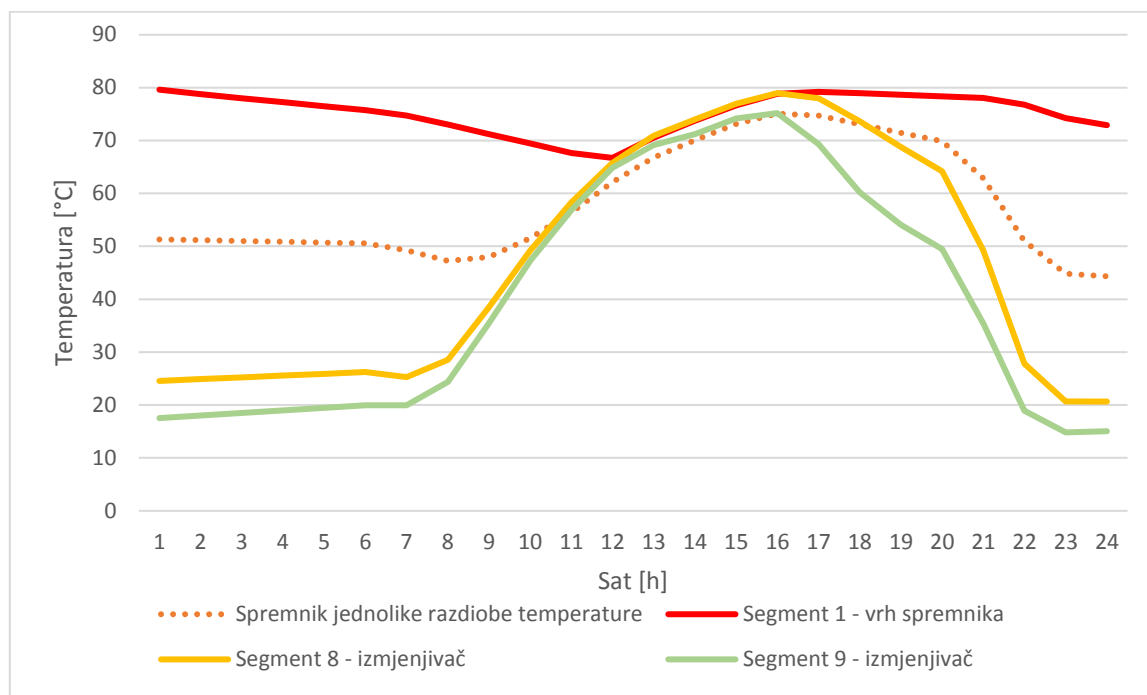
Prikazanom usporedbom rezultata simulacije utvrđena je razlika u dobicima toplinske energije sunčanog sustava kroz cijelu godinu, pri čemu model s jednolikom razdiobom pokazuje 8% manje dobitke od Sunca. Godišnji dobitci energije sustava sa stratifikacijskim modelom spremnika iznose 2447 kWh dok kod modela s jednolikom razdiobom temperature spremnika iznose 2256 kWh. Godišnja potrebna energija dodatnog grijača sustava s temperaturnom stratifikacijom spremnika iznosi 2084 kWh dok kod sustava sa spremnikom jednolike temperature iznosi 2333 kWh.

Usporedba rezultata simulacije za područje grada Splita prikazana je na Slici 17. pri čemu model s jednolikom razdiobom pokazuje 5% manje dobitke od Sunca. Godišnji dobitci energije sustava s temperaturnom stratifikacijom iznose 3109 kWh dok kod modela s jednolikom razdiobom temperature spremnika iznose 2945 kWh. Godišnja potrebna energija dodatnog grijača za sustav s temperaturnom stratifikacijom iznosi 1453 kWh, a kod sustava sa spremnikom jednolike temperature iznosi 1673 kWh.



**Slika 17. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava, stratifikacijski model spremnika i model spremnika s jednolikom razdiobom temperature za grad Split**

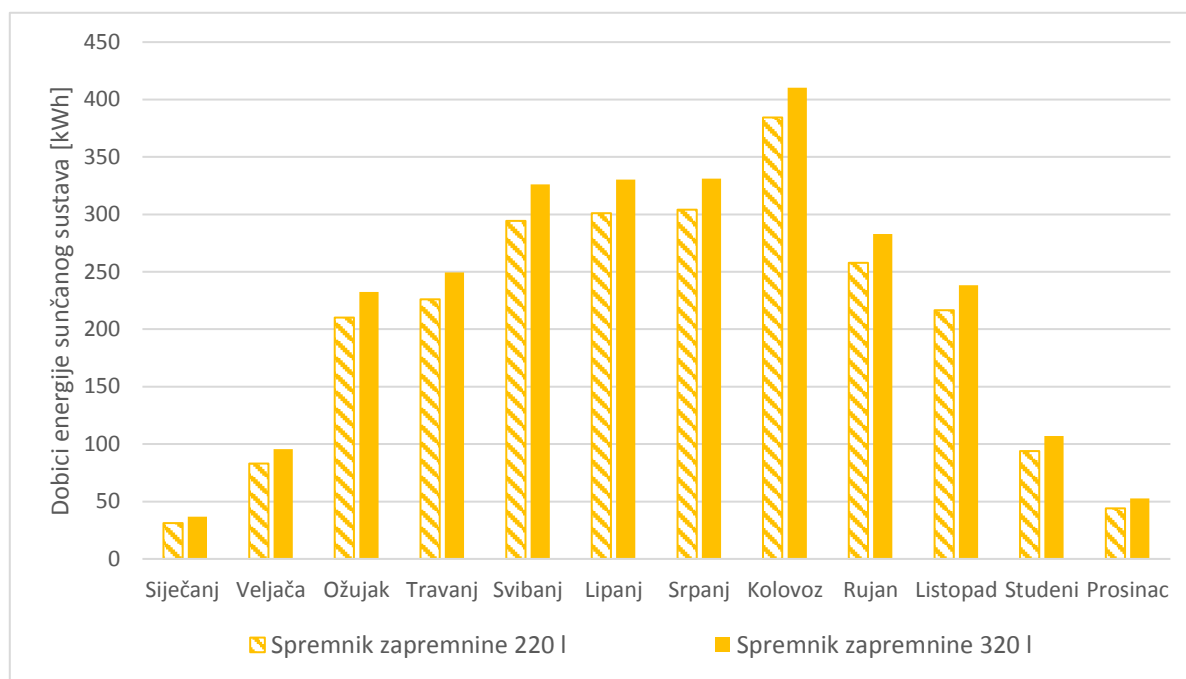
Na Slici 18. prikazana je usporedba temperatura u spremniku između stratifikacijskog modela spremnika i modela spremnika s jednolikom razdiobom temperature. U jutarnjim satima temperatura u segmentima gdje se nalazi izmjenjivač topline niža je od temperature spremnika s jednolikom razdiobom temperature što za posljedicu ima nižu temperaturu radnog medija na ulazu u kolektor, a samim time veću učinkovitost sunčanog kolektora te veću prikupljenu energiju. Tijekom dana razlika između spremnika jednolike temperature i segmenata gdje se nalazi izmjenjivač je mala te ne dolazi do veće razlike u radnoj temperaturi kolektora.



**Slika 18. Profil temperatura u spremniku tople vode tijekom dana, stratifikacijski spremnik i spremnik s jednolikom razdiobom temperature**

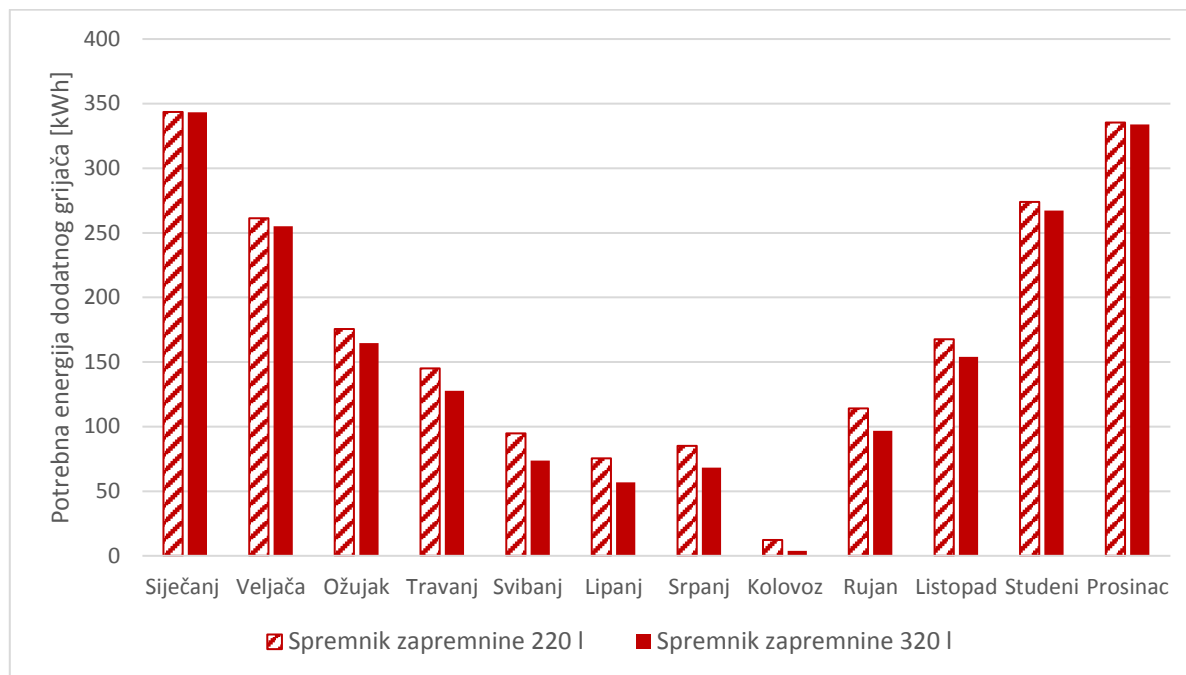
#### 4.4. Optimizacija sunčanog sustava

Kako bi se ispitao utjecaj povećanja zapremnine spremnika tople vode na energetske bilancu sunčanog sustava, provedena je simulacija sa spremnikom zapremnine 320 l. Usporedba rezultata simulacije za spremnike od 220 l i 320 l prikazana je na Slici 19.



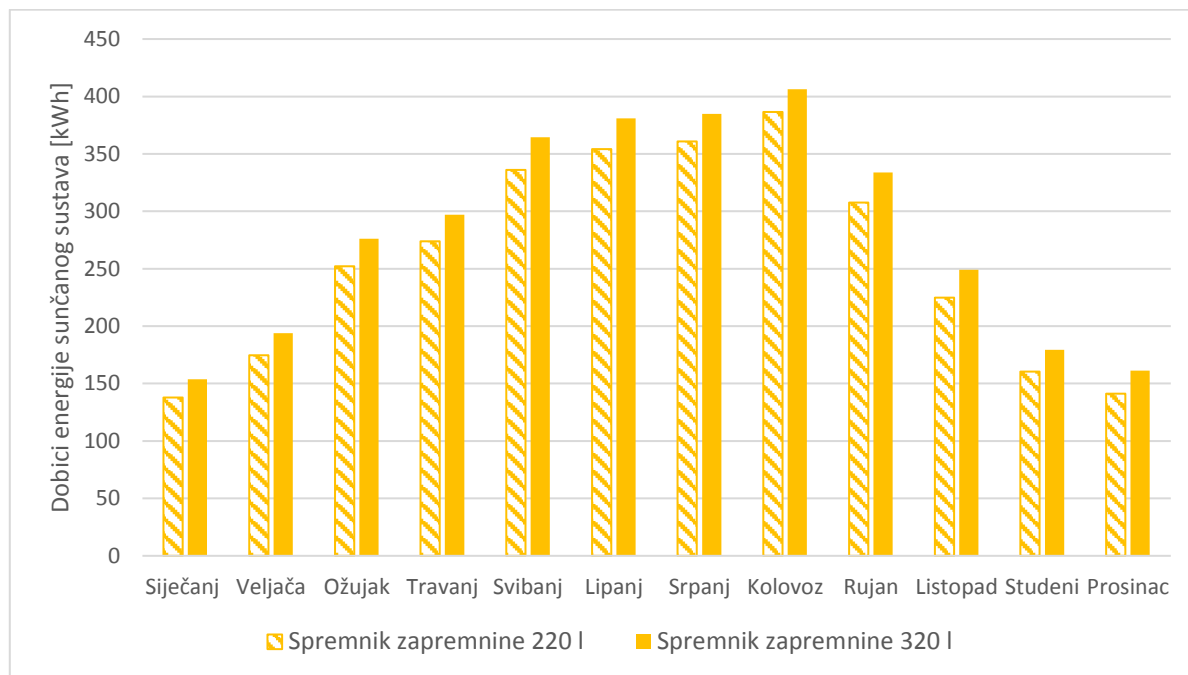
**Slika 19. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava s dvije različite zapremnine spremnika PTV-a, grad Zagreb**

Tijekom cijele godine dobiti energije sunčanog sustava na području grada Zagreba su veći kod sustava sa spremnikom zapremnine 320 l, pri čemu na godišnjoj razini razlika iznosi 9%. Godišnji toplinski gubici spremnika zapremnine 320 l iznose 391 kWh dok kod spremnika zapremnine 220 l iznose 282 kWh. Unatoč povećanju toplinskih gubitaka spremnika tople vode za 28%, potrebna energija dodatnog grijača je smanjena u odnosu na spremnik zapremnine 220 l za 7%. Usporedba potrebne energije dodatnog grijača prikazana je na Slici 20. Stupanj pokrivanja potreba za energijom sustava na području grada Zagreba sa spremnikom zapremnine 320 l iznosi 58%, dok kod sustava sa spremnikom zapremnine 220 l iznosi 54%.



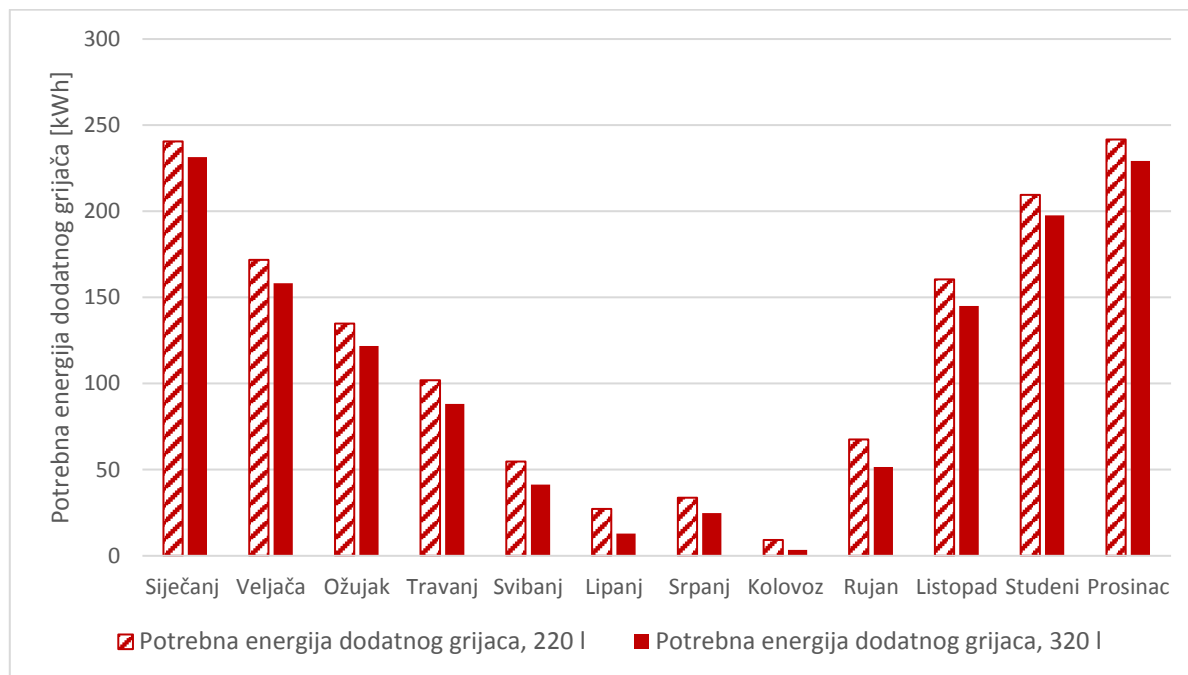
**Slika 20. Usporedba potrebne energije dodatnog grijača sunčanog sustava s dvije različite zapremnine spremnika PTV-a, grad Zagreb**

Na Slici 21. prikazana je usporedba dobitaka energije sunčanog sustava u gradu Splitu. Dobici energije također su veći kod sustava sa spremnikom zapremnine 320 l, pri čemu razlika na godišnjoj razini iznosi 8%, odnosno 271 kWh. U ljetnim mjesecima sunčani sustav sa spremnikom zapremnine 320 l pokriva 97% potreba za energijom.



**Slika 21. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava s dvije različite zapremnine spremnika PTV-a, grad Split**

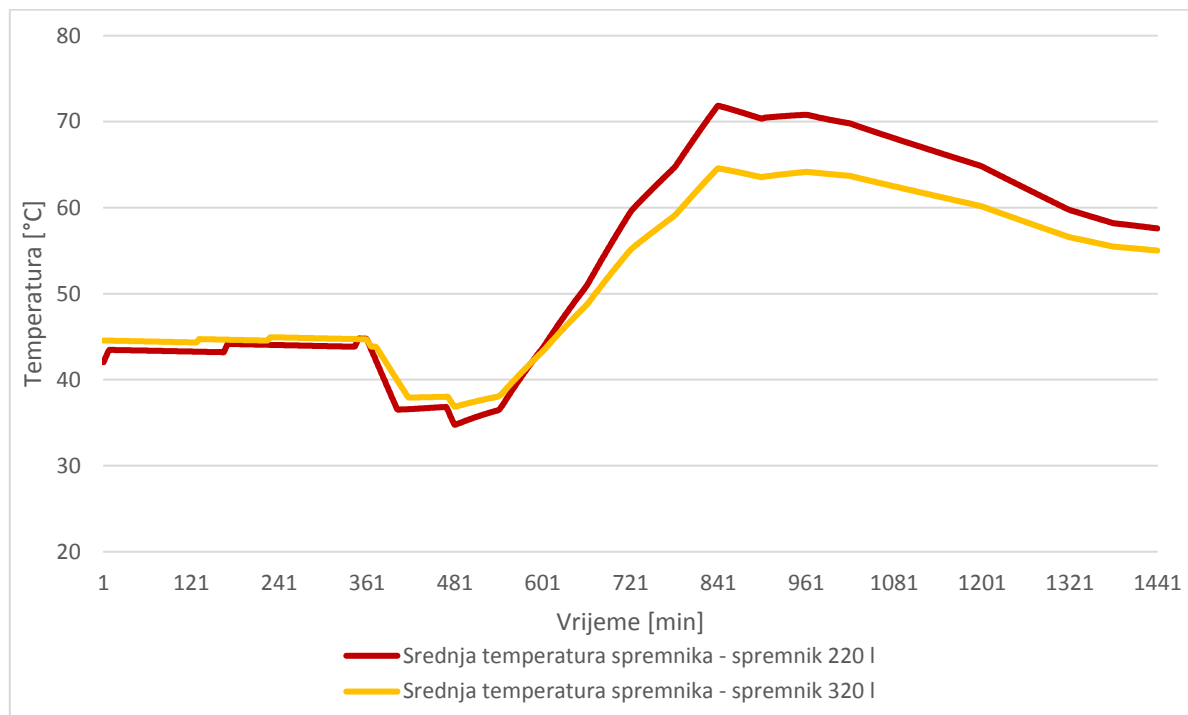
Usporedba potrebne energije dodatnog grijača prikazana je na Slici 22. Potrebna energija dodatnog grijača je smanjena u odnosu na spremnik manje zapremnine. Godišnji toplinski gubici spremnika zapremnine 320 l iznose 436 kWh dok kod spremnika zapremnine 220 l iznose 312 kWh. Stupanj pokrivanja potreba za energijom sustava sa spremnikom zapremnine 320l iznosi 74%, dok kod sustava sa spremnikom zapremnine 220l iznosi 68%.



**Slika 22. Usporedba potrebne energije dodatnog grijača sunčanog sustava s dvije zapremnine spremnika PTV-a, grad Split**

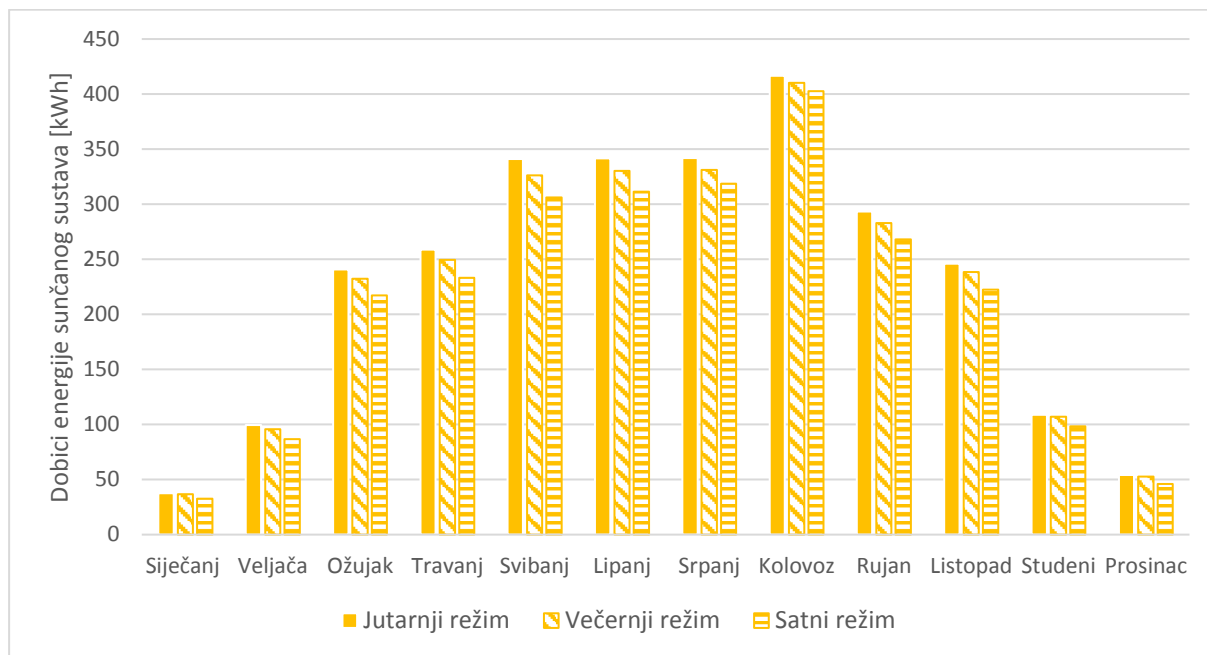
Povećanje zapremnine spremnika potrošne tople vode rezultiralo je povećanjem toplinskih dobitaka sunčanog sustava na području grada Zagreba kao i na području grada Splita. Kako bi se objasnile razlike između rezultata simulacija, na Slici 23. prikazano je kretanje srednje temperature spremnika tijekom dana za dvije zapremnine spremnika. Kada postoje toplinski dobici sunčanih kolektora, porast srednje temperature spremnika zapremnine 220 l je veći zbog manje količine vode u spremniku. Viša temperatura vode u dijelu spremnika gdje je smješten izmjenjivač topline kruga kolektora za posljedicu ima nižu učinkovitost sunčanih kolektora. Analiziranjem temperatura u spremniku tijekom godine utvrđeno je smanjenje perioda prekida rada sunčanog sustava uslijed prekoračenja maksimalne temperature u spremniku.





**Slika 23. Srednja temperatura spremnika za dvije različite zapremnine**

Ispitivanje utjecaja režima potrošnje tople vode provedeno je u svrhu određivanja utjecaja na energetske bilancu sunčanog sustava. Većernji i jutarnji režim potrošnje tople vode predstavljaju uobičajene navike ukućana. Satnim režimom simulira se najnepovoljniji slučaj potrošnje tople vode, odnosno naglo pražnjenje spremnika tople vode u večernjim satima te ponovno zagrijavanje tople vode dodatnim grijačem, u ovom slučaju električnim grijačem. Na Slici 24. prikazana je usporedba dobitaka energije sunčanog sustava sa spremnikom zapremnine 320 l za sva tri režima potrošnje tople vode za sunčani sustav na području grada Zagreba.



**Slika 24. Usporedba dobitaka energije sunčanog sustava za različite režime potrošnje tople vode, grad Zagreb, spremnik tople vode 320 l**

Razlike u dobicima energije sunčanog sustava između tri režima korištenja prisutne su tijekom cijele godine. Tijekom zime na području grada Zagreba insolacija je mala te stoga kod sva tri režima potrošnje dodatni grijač pokriva većinu potreba za energijom. Međutim, razlike među režimima postaju izraženije u ljetnim mjesecima. Razlika u dobicima energije sunčanog sustava na godišnjoj razini iznosi 3% (93 kWh) između jutarnjeg i večernjeg režima potrošnje te 9% (247 kWh) između jutarnjeg i satnog režima, pri čemu jutarnji režim ima najveće dobitke od sva tri analizirana režima.

Razlika dobitaka energije sunčanog sustava na području grada Splita između jutarnjeg i večernjeg režima potrošnje iznosi 2,5% (90 kWh) a između jutarnjeg i satnog režima iznosi 6,5% (220 kWh). Kao i kod sustava na području Zagreba jutarnji režim ima najveće dobitke energije.

U Tablici 4. prikazan je pregled rezultata simulacija provedenih za dvije zapremnine spremnika tople vode i za sve režime potrošnje vode za klimatsko područje grada Zagreba i grada Splita. Sve simulacije provedene su na minutnoj bazi za spremnik sa stratifikacijom temperature. Stupanj pokrivanja sunčanog sustava u ovisnosti o režimu potrošnje tople vode i zapremini spremnika tople vode kreće se u rasponu od 49% (satni režim potrošnje PTV-a,

spremnik zapremnine 220 l) do 60% (jutarnji režim potrošnje PTV-a, spremnik zapremnine 320 l) za sustav na području grada Zagreba. Rezultati simulacija za klimatsko područje grada Splita pokazuju stupanj pokrivanja potreba za energijom sunčanog sustava u rasponu od 63% (satni režim potrošnje PTV-a, spremnik zapremnine 220 l) do 74% (jutarnji režim potrošnje PTV-a, spremnik zapremnine 320 l).

	Režim potrošnje tople vode	Q <sub>kol</sub>	Q <sub>grijač</sub>	Q <sub>gubici</sub>
		[kWh]	[kWh]	[kWh]
		Grad Zagreb		
220 l spremnik	Jutarnji	2592	1956	299
	Večernji	2447	2084	283
	Satni	2192	2304	277
320 l spremnik	Jutarnji	2780	1881	412
	Večernji	2693	1945	391
	Satni	2543	2126	376
		Grad Split		
220 l spremnik	Jutarnji	3251	1339	339
	Večernji	3109	1453	312
	Satni	2860	1654	300
320 l spremnik	Jutarnji	3470	1246	464
	Večernji	3380	1305	436
	Satni	3250	1466	412

**Tablica 4. Rezultati simulacija za različite režime potrošnje tople vode te dvije zapremnine spremnika**

## 5. Proračun energijskih zahtjeva prema normi HRN EN 15316-4-3

U ovom poglavlju opisan je proračun sunčanog sustava prema Algoritmu za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti sustava [8]. Najčešće korištena metoda proračuna sunčanih sustava je mjesečna metoda proračuna te je stoga proračun sunčanog sustava modeliranog u ovom radu proveden prema istoj. Rezultati proračuna za klimatsko područje grada Zagreba i grada Splita prema mjesečnoj metodi uspoređeni su sa rezultatima računalnih simulacija provedenih korištenjem računalnih programa TRNSYS i MATLAB prikazanim u prethodnom poglavlju.

### 5.1. Mjesečni proračun sustava sunčevog zračenja

Za mjesečni proračun spremnika i sustava sunčevog zračenja za zagrijavanje potrošne tople vode koristi se metoda B prema normi HRN EN 15316-4-3:2008.

Ulazne veličine proračuna:

$\eta_0$	učinkovitost kolektora pri razlici srednje temperature radnog medija i zraka pri 0 K [-]
$a_1$	koeficijent toplinskih gubitaka prvog reda [W/(m <sup>2</sup> K)]
$a_2$	koeficijent toplinskih gubitaka drugog reda [W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )]
IAM	faktor promjene kuta upadnog zračenja [-]
$A_w$	površina kolektora za pripremu PTV-a [m <sup>2</sup> ]
$\eta_{loop}$	faktor učinkovitosti kolektorskog kruga [-]
$V_{nom}$	zapremnina spremnika [l]
$V_{bu}$	zapremnina dijela spremnika između vrha spremnika i donjeg dijela dodatnog grijaćeg elementa [l]
$V_{sol}$	zapremnina dijela spremnika grijanog kolektorima [l]
$U_{loop}$	koeficijent toplinskih gubitaka kolektorskog kruga [W/m <sup>2</sup> K]
$U_{loop,p}$	koeficijent toplinskih gubitaka cjevovoda u kolektorskom krugu [W/K]
$U_{st}$	koeficijent toplinskih gubitaka spremnika [W/K]
$I_m$	prosječno mjesečno sunčevo zračenje [W/m <sup>2</sup> ]
$t_m$	broj sati u pojedinom mjesecu [h]
$\vartheta_{e,m}$	prosječna vanjska temperatura u mjesecu [°C]
$\vartheta_{cw}$	temperatura hladne vode [°C]

$\vartheta_w$	tražena temperatura PTV-a [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{a,avg}$	prosječna temperatura okolišnog zraka [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\vartheta_{setpoint,W}$	referentna temperatura PTV-a [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$Q_{W;dis,in,m}$	toplinska energija na ulazu u podsustav razvoda [kWh]

Mjesečno toplinsko opterećenje sunčanog sustava za pripremu PTV-a računa se prema

$$Q_{W,sol,us,m} = Q_{W,dis,in,m} \quad (30)$$

Isporučena sunčana energija u sustav računa se prema

$$Q_{W,sol,out,m} = Q_{W,sol,us,m} * (aY_W + bX_W + cY_W^2 + dX_W^2 + eY_W^3 + fX_W^3) \quad [\text{kWh}] \quad (31)$$

pri čemu su:

a, b, c, d, e, f	konstante
X, Y	bezdimenzijski faktori

Faktor X računa se prema:

$$X_W = A_W * U_{loop} * \eta_{loop} * \Delta T * f_{st} * t_m / (Q_{W,sol,us,m} * 1000) \quad [\text{kWh}] \quad (32)$$

Korekcijski faktor zapremnine spremnika računa se prema:

$$f_{aux} = 0,3 * V_{bu} / V_{nom} \quad [-] \quad (33)$$

$$V_{sol} = V_{nom} * (1 - f_{aux}) \quad [\text{l}] \quad (34)$$

$$f_{st} = (75 * A_W / V_{sol})^{0,25} \quad [-] \quad (35)$$

Koeficijent toplinskih gubitaka kolektorskog kruga računa se prema

$$U_{loop} = a_1 + a_2 * 40 + U_{loop,p} / A \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (36)$$

Referentna temperaturna razlika računa se prema

$$\vartheta_{\text{ref}} = 11,6 + 1,18 * \vartheta_w + 3,86 * \vartheta_{cw} - 1,32 * \vartheta_{e,\text{avg}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (37)$$

$$\Delta T = \vartheta_{\text{ref}} - \vartheta_{e,\text{avg}} \quad [\text{K}] \quad (38)$$

Faktor Y računa se prema:

$$Y_W = A_W * IAM * \eta_0 * \eta_{\text{loop}} * I_m * t_m / (Q_{W,\text{sol.us.m}} * 1000) \quad [\text{kWh}] \quad (39)$$

Toplinski gubici sunčanog spremnika (koje namiruje sunčani sustav) računaju se prema:

$$Q_{W,\text{sol,st}} = U_{\text{st}} * (\vartheta_{\text{setpoint,W}} - \vartheta_{a,\text{avg}}) * (Q_{W,\text{sol.out.m}} / Q_{W,\text{sol.us.m}}) t_m / 1000 \quad [\text{kWh}] \quad (40)$$

Ukupni koeficijent toplinskih gubitaka spremnika računa se prema:

$$Q_{W,\text{sol,st}} = 0,16 * V_{\text{sol}}^{0,5} \quad [\text{W/K}] \quad (41)$$

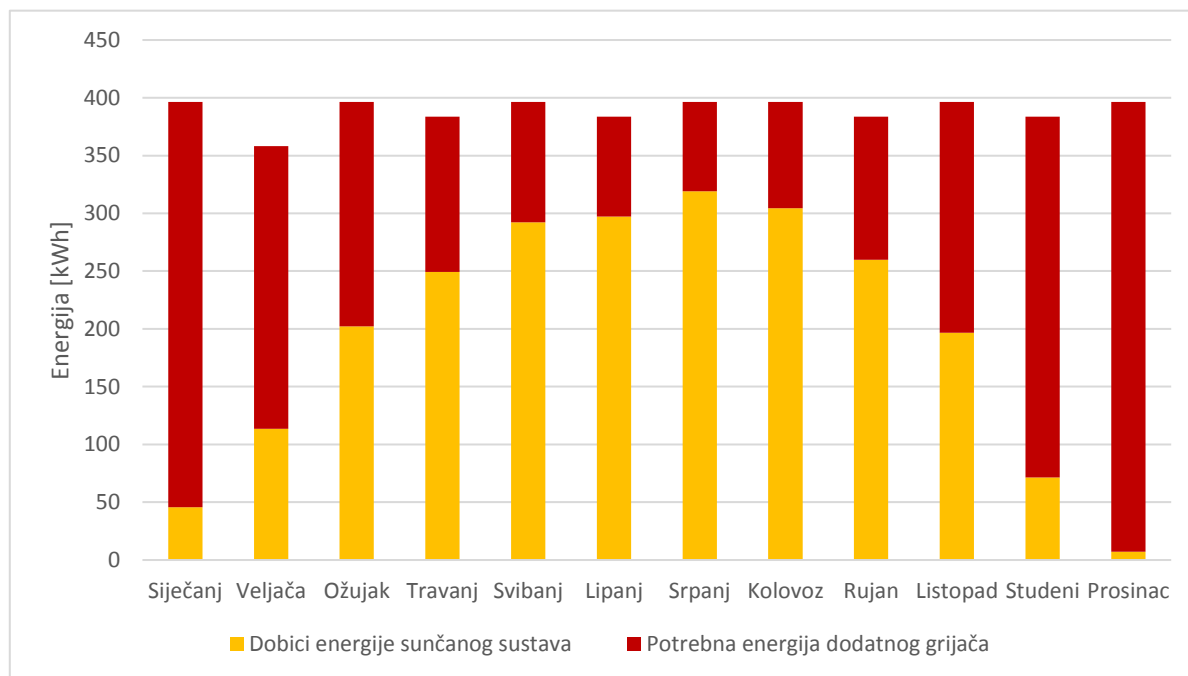
Pri tome su ukupni toplinski gubici spremnika:

$$Q_{\text{st,ls,m}} = 0,16 * V_{\text{nom}}^{0,5} * (\vartheta_{\text{setpoint,W}} - \vartheta_{a,\text{avg}}) t_m / 1000 \quad [\text{kWh}] \quad (42)$$

## 5.2. Rezultati mjesečnog proračuna prema normi HRN EN 15316-4-3

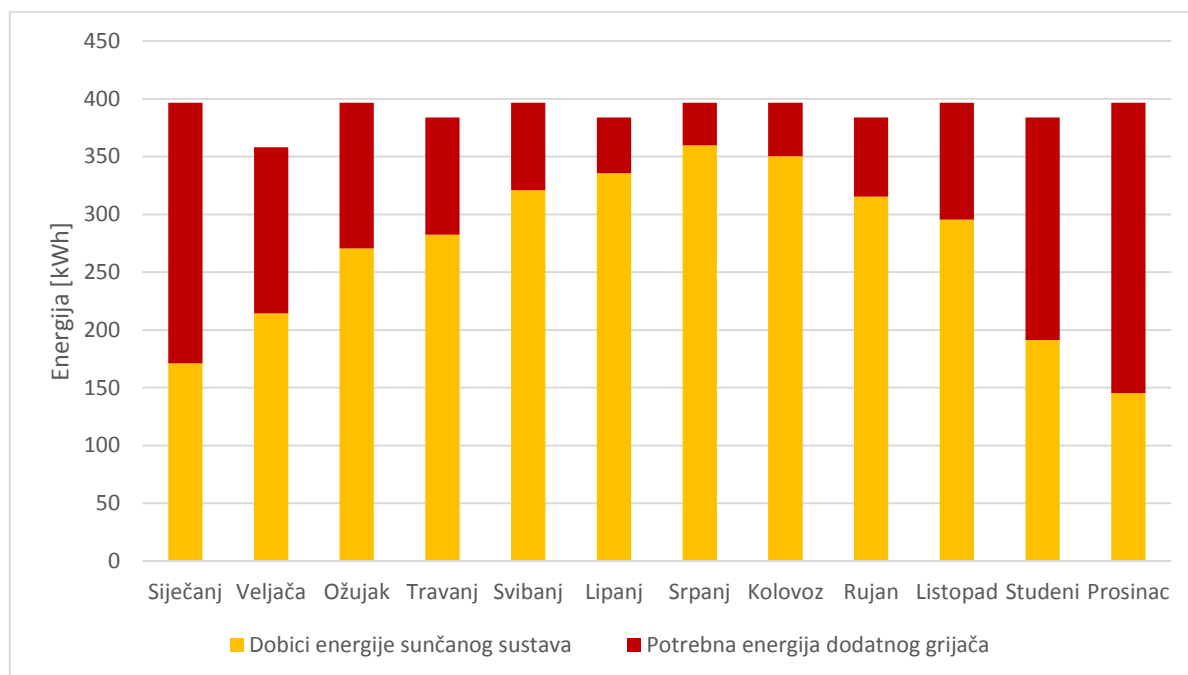
Proračun je proveden za sunčani sustav s dva sunčana kolektora te spremnikom tople vode zapremnine 320 l. Gubici topline cjevovoda sunčanog sustava nisu uzeti u obzir. Temperatura zraka prostora u kojem je smješten spremnik je pretpostavljena konstantnom te iznosi 15°C tijekom cijele godine.

Na Slici 25. prikazani su rezultati proračuna za sunčani sustav na području grada Zagreba. Sunčani sustav pokriva 50% potrebne toplinske energije, dok ukupni godišnji dobici energije iznose 2358 kWh. Sunčani sustav u ljetnim mjesecima pokriva 70% potreba za energijom.



**Slika 25. Energetska bilanca sunčanog sustava za grad Zagreb prema normi HRN EN 15316-4-3**

Na Slici 26. prikazana je energetska bilanca sunčanog sustava na području grada Splita. Stupanj pokrivanja potreba za energijom iznosi 69%, dok ukupni godišnji dobici energije sunčanog sustava iznose 3252 kWh. Potrebna energija dodatnog grijača iznosi 1416 kWh. U ljetnim mjesecima sunčani sustav pokriva 85% potreba za energijom.

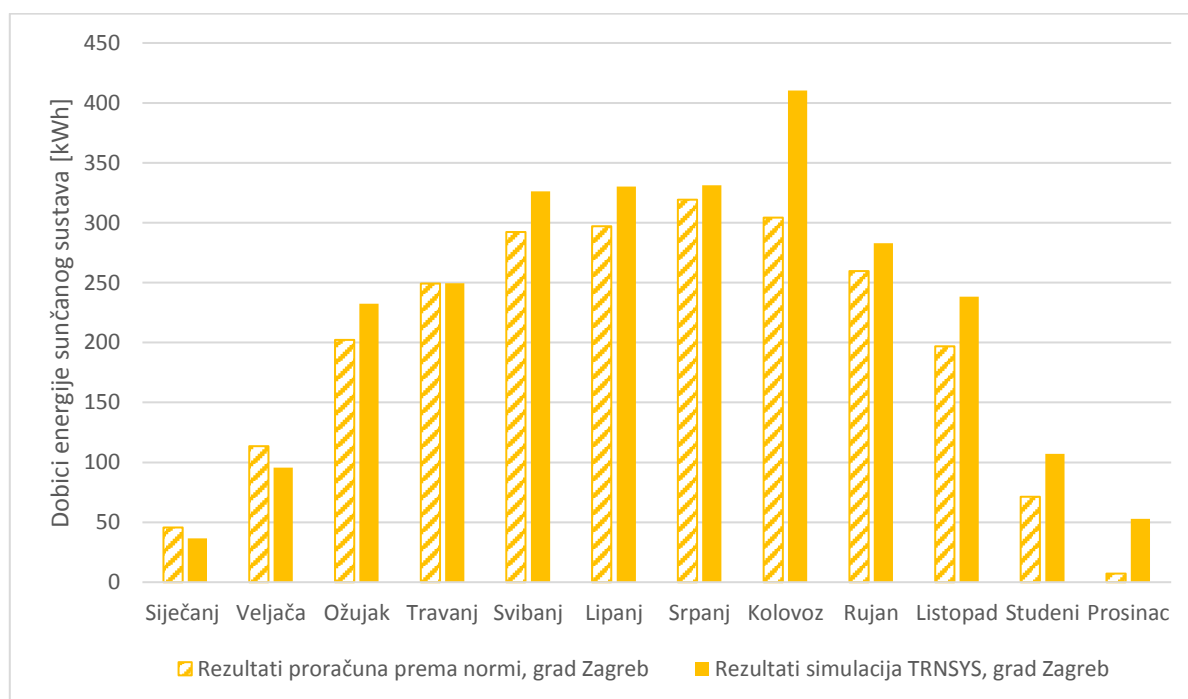


**Slika 26. Energetska bilanca sunčanog sustava za grad Split prema normi HRN EN 15316-4-3**



### 5.3. Usporedba rezultata mjesečnog proračuna te rezultata detaljnih računalnih simulacija sunčanog sustava

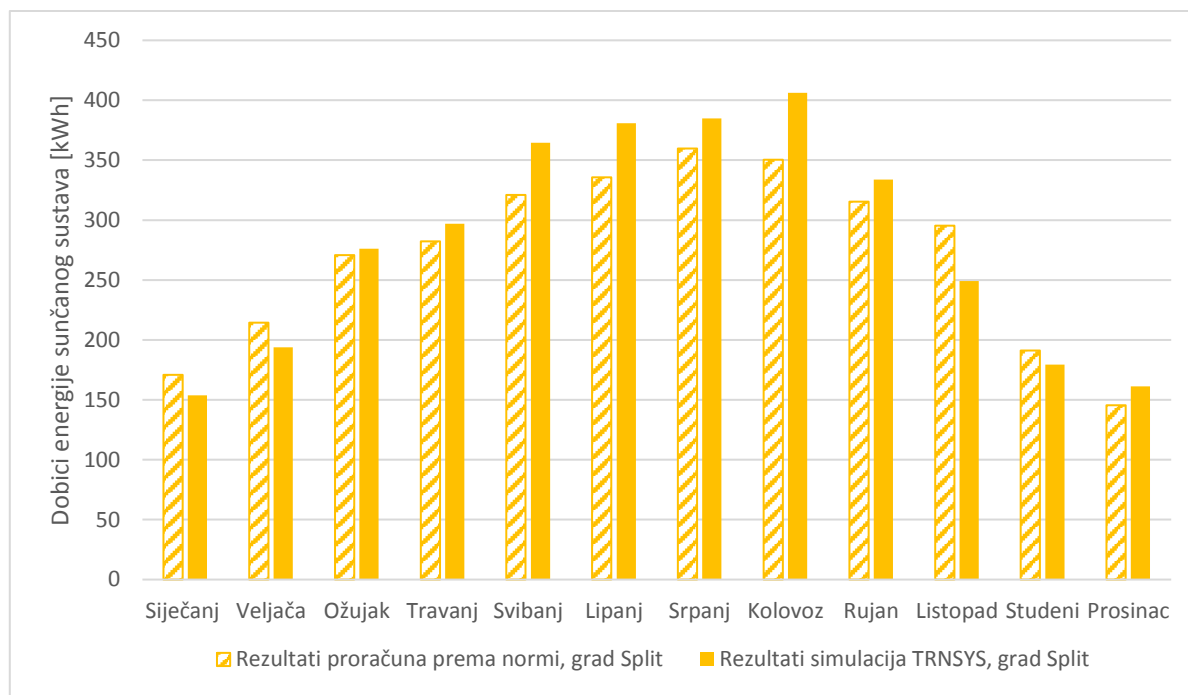
U nastavku ovog poglavlja prikazana je usporedba rezultata proračuna prema normi HRN EN 15316-4-3 te detaljnih računalnih simulacija za klimatsko područje grada Zagreba i grada Splita. Uspoređivani su rezultati simulacije sunčanog sustava s 2 sunčana kolektora te spremnikom tople vode s temperaturnom stratifikacijom zapremnine 320 l za večernji režim potrošnje tople vode. Na Slici 27. prikazana je usporedba dobitaka energije sunčanog sustava za područje grada Zagreba.



Slika 27. Mjesečni dobitci energije sunčanog sustava, grad Zagreb

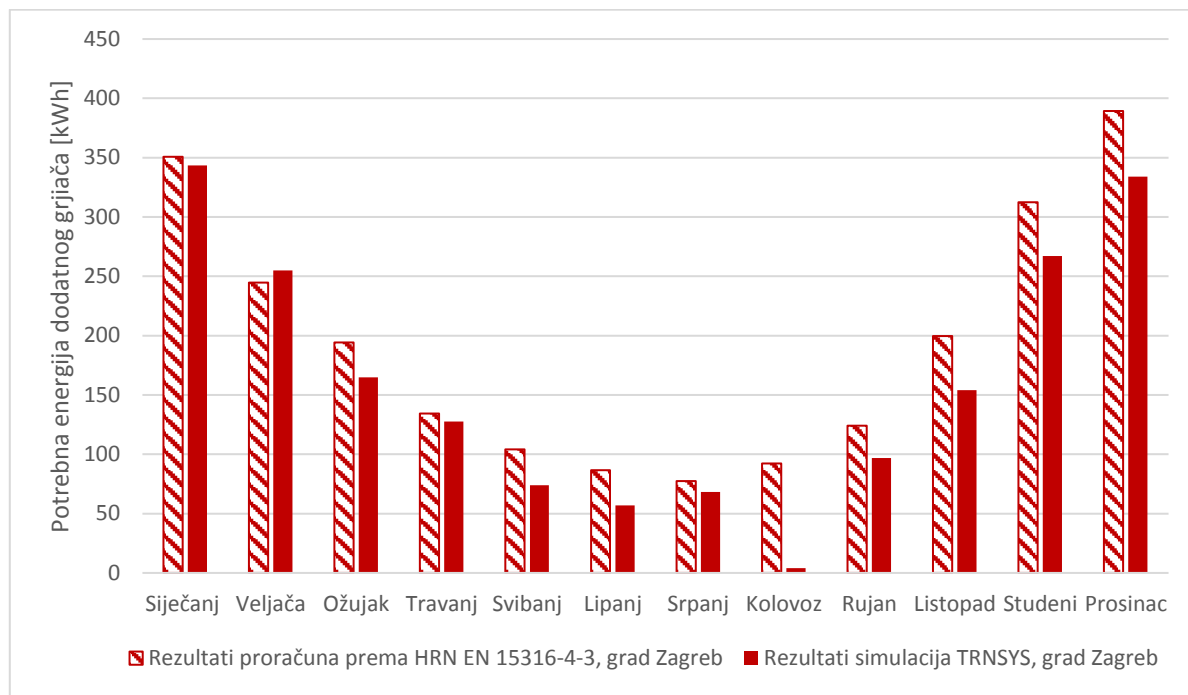
Usporedbom rezultata proračuna i rezultata simulacija vidljivo je da su dobitci energije sunčanog sustava prema rezultatima simulacije korištenjem računalnog programa TRNSYS veći nego prema rezultatima proračuna. Najveće razlike u dobicima energije sunčanog sustava za područje grada Zagreba su u ljetnim mjesecima i u prosincu pri čemu su prema proračunu normom u prosincu dobitci energije sunčanog sustava neznatni. Na godišnjoj razini dobitci energije sunčanog sustava prema normi iznose 2358 kWh za grad Zagreb što je 12,5% manje u odnosu na rezultate simulacije.

Na Slici 28. prikazana je usporedba dobitaka energije sunčanog sustava prema rezultatima simulacija i rezultatima proračuna prema HRN EN 15316-4-3 za grad Split, dobitci energije sunčanog sustava na godišnjoj razini veći su za 4% prema rezultatima simulacija u programu TRNSYS. Dobitci energije sunčanog sustava prema rezultatima proračuna prema normi veći su u siječnju, veljači, listopadu i studenom.



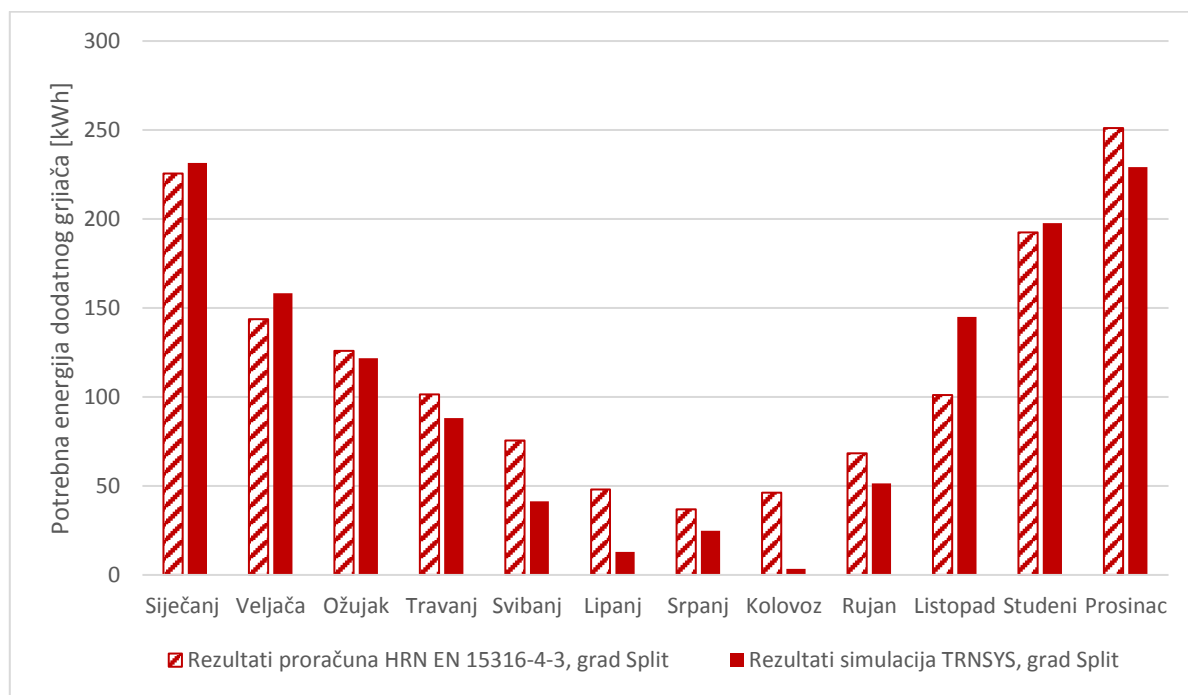
**Slika 28. Mjesečni dobitci energije sunčanog sustava, grad Split**

Potrebna energija dodatnog grijača očekivano je veća prema proračunu. Na Slici 29. je vidljivo da sunčani sustav u gradu Zagrebu prema rezultatima simulacije softverom TRNSYS pokriva cijelu potrebu za energijom u kolovozu dok prema rezultatima proračuna prema normi postoji potreba za zagrijavanje spremnika tople vode dodatnim grijačem. Godišnja potrebna energija sunčanog sustava na području grada Zagreba veća je 16% u odnosu na rezultate prema simulaciji provedenoj softverom TRNSYS.



**Slika 29. Potrebna energija dodatnog grijača, usporedba rezultata prema HRN EN 15316-4-3 i računalnih simulacija u TRNSYS-u, grad Zagreb**

Sunčani sustav na području grada Splita prema rezultatima proračuna ima 8% veću potrebu za energijom dodatnog grijača. Uzrok ovako izraženim razlikama potrebne energije dodatnog grijača su veći dobici energije sunčanih kolektora prema rezultatima simulacija provedenih softverom TRNSYS čime se zadovoljava veći dio potreba za energijom pri zagrijavanju potrošne tople vode. Usporedba potrebne energije dodatnog grijača prikazana je na Slici 30.



**Slika 30. Potrebna energija dodatnog grijača, usporedba rezultata prema HRN EN 15316-4-3 i računalnih simulacija u TRNSYS-u, grad Split**

## 6. Zaključak

Cilj rada bila je analiza i optimizacija sunčanog sustava za zagrijavanje potrošne tople vode korištenjem računalnih alata za energijsko modeliranje sustava na primjeru tipične obiteljske kuće. Također, ispitan je utjecaj modeliranja spremnika tople vode kao spremnika s jednolikom razdiobom temperature te modeliranje spremnika s temperaturnom stratifikacijom. Uz navedeno, uspoređeni su rezultati detaljnih računalnih simulacija provedenih korištenjem računalnih programa TRNSYS i MATLAB s rezultatima proračuna prema normi HRN EN 15316-4-3. Računalne simulacije provedene su na satnoj i minutnoj bazi za tipičnu meteorološku godinu za klimatsko područje grada Zagreba i grada Splita.

Sunčani sustav dimenzioniran je za četveročlanu obitelj, pri čemu dnevna potrošnja tople vode iznosi 200 l vode temperature 60°C. Simulacije su provedene za tri različita režima potrošnje tople vode tijekom dana u svrhu ispitivanja utjecaja perioda potrošnje tople vode na sunčani sustav. Kako bi se ispitao utjecaj veličine spremnika na energetske bilancu sunčanog sustava, također su provedene simulacije za spremnik tople vode zapremnine 220 l te spremnik zapremnine 320 l. Odabrana su dva pločasta kolektora ukupne površine 5,04 m<sup>2</sup>. Radni medij sunčanog kruga je smjesa vode i glikola.

Spremnik s temperaturnom stratifikacijom modeliran je na način da je spremnik podijeljen u izotermne segmente jednakog volumena, te su prema tehničkim karakteristikama spremnika određene pozicije električnog grijača, izmjenjivača topline te ulaznih i izlaznih priključaka. Izmjena topline u spremniku modelirana je uzimajući u obzir: provođenje topline između segmenata, protok struja fluida pri punjenju/praznjenju spremnika, prolaz topline kroz oplatu spremnika prema okolišu, izmjenu topline s fluidom u izmjenjivaču topline, miješanje vode između segmenata uzrokovano uzgonskim silama te izmjenu topline dodatnog grijaćeg elementa.

Rezultati analize pokazali su da sunčani sustav sa stratifikacijskim spremnikom zapremnine 220 l na klimatskom području grada Zagreba pokriva 54% potreba za zagrijavanje potrošne tople vode pri čemu je godišnji prinos energije sunčanih kolektora 2447 kWh, a potrebna energija dodatnog grijača 2084 kWh. Na klimatskom području grada Splita sunčani sustav može pokriti 71% potreba za zagrijavanje potrošne tople vode, pri čemu je godišnji

prinos energije sunčanih kolektora 3251 kWh, a potrebna energija dodatnog grijača iznosi 1339 kWh.

Usporedbom rezultata simulacije spremnika jednolike temperature i spremnika s temperaturnom stratifikacijom utvrđeno je da sustav modeliran sa spremnikom jednolike temperature ima manje dobitke energije sunčanog sustava u iznosu od 8% godišnje za sustav na području grada Zagreba te 5% za sunčani sustav na području grada Splita. Razlika nastaje uslijed niže temperature spremnika u području izmjenjivača topline, što rezultira većom učinkovitošću sunčanih kolektora, a time većim dobicima od Sunca.

Kako bi se ispitao utjecaj akumulacije topline spremnika tople vode provedene su simulacije rada sunčanog sustava sa spremnikom potrošne tople vode zapremnine 220 l i 320 l. Utvrđeni su veći dobici energije sunčanog sustava sa spremnikom većeg volumena. Godišnji dobici energije sunčanog sustava sa spremnikom zapremine 320 l veći su za 9% za sunčani sustav na području grada Zagreba te 8% za sunčani sustav na području Splita. Razlog povećanim dobicima energije sunčanog sustava je sporije zagrijavanje spremnika većeg volumena pri radu sunčanog sustava, što za posljedicu ima nižu temperaturu u području izmjenjivača topline te nižu radnu temperaturu radnog medija, što povećava učinkovitost kolektora a time i dobitke od Sunca. Također, veći spremnik ima kraći period prekida rada sunčanog sustava koji može nastati uslijed pojave visokih temperatura u spremniku. Stoga sunčani sustav s velikim spremnikom ima smanjenju godišnju potrebu za energijom dodatnog grijača od 7% na području Zagreba te 11% na području Splita, unatoč činjenici da ima povećane gubitke topline uslijed većeg obujma ovojnice u odnosu na sustav s manjim spremnikom.

U radu je također ispitan utjecaj tri dnevna režima potrošnje tople vode na energetske bilancu sunčanog sustava. Prema rezultatima simulacija utvrđeno je da potrošnja većine dnevne potrebe za toplom vodom u jutarnjim satima rezultira nešto većim prinosima energije sunčanih kolektora. Dobici energije solarnih kolektora prema jutarnjem režimu potrošnje tople vode veći su za 3% u odnosu na večernji režim te 7% u odnosu na režim potrošnje dnevne količine tople vode u jednom večernjem satu.

Konačno, uspoređeni su rezultati detaljnih simulacija korištenjem računalnih programa TRNSYS i MATLAB sa rezultatima mjesečnog proračuna prema normi HRN EN 15316-4-3. Dobici energije sunčanog sustava prema rezultatima računalnih simulacija su veći za 12,5% za

sunčani sustav na području grada Zagreba te 4% za sustav na području Splita. Godišnja potrebna energija dodatnog grijača prema rezultatima prema HRN EN 15316-4-3 veća je za 16% za sunčani sustav na području grada Zagreba te 8% za sustav na području grada Splita.

## LITERATURA

- [1] Balen I: Podloge za predavanje iz kolegija Grijanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [2] Trnsys 17, Volume 4, Mathematical Reference, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin - Madison, 2012
- [3] TESSLibs 17, Volume 11, Storage Tank Library Mathematical Reference, Thermal Energy System Specialists, LLC of Madison, Wisconsin, USA, 2012
- [4] Recknagel, Sprenger, Schramek, Čeperković: Grijanje i klimatizacija, Interklima, Vrnjačka Banja 2004.
- [5] Solar thermal panels and system components, Technical data, Hoval Ltd, United Kingdom
- [6] <http://www.tyfo.de/en/product/tyfocor-ls/>
- [7] E.M. Kleinbach: Performance Study of One-Dimensional Models for Stratified Thermal Storage Tank, University of Wisconsin-Madison, 1990.
- [8] Dović D., Horvat I., Rodić A., Soldo V., Švaić Š.: Algoritam za određivanje energijskih zahtjeva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama, Sustavi grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.



## **PRILOZI**

- I. DR – MH – 001 - Tehnička shema sunčanog sustava

